

Edgar Serna M. (Editor)



DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Vol. II, Edición 6



Medellín - Antioquia
2021

Edgar Serna M. (Editor)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Vol. II, Edición 6

ISBN: 978-958-53278-6-3

Desarrollo e innovación en ingeniería. [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 6a ed. -- Medellín:
Instituto Antioqueño de Investigación, 2021.
2 v. Archivo en formato digital (pdf) – (Ingeniería y ciencia)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-53278-5-6 (vol. I) 978-958-53278-6-3 (vol. II)

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones 2. Investigación industrial I. Serna M.,
Edgar, ed.

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1080788

Investigación Científica

ISBN: 978-958-53278-6-3

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5513920>

Hecho el Depósito Legal Digital

Desarrollo e Innovación en Ingeniería Vol. II

Serie: Ingeniería y Ciencia

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Edición 6: septiembre 2021

Publicación electrónica gratuita

©2021 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido de esta publicación está autorizado bajo Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas mencionadas en el texto pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI; no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este texto.

Ni los autores, ni la Editorial, ni el IAI serán responsables de los daños causados, o presuntamente causados, directa o indirectamente por el contenido en este libro.

Maquetación: Instituto Antioqueño de Investigación IAI

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Compilador: Alexei Serna A.

Financiador de la publicación: Instituto Antioqueño de Investigación

Instituto Antioqueño de Investigación IAI

<http://fundacioniai.org>

contacto@fundacioniai.org

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

<http://fundacioniai.org/index.php/editorial.html>

editorial@fundacioniai.org

Medellín, Antioquia



Prólogo

¿Conocemos realmente el alcance del impacto que tiene la ingeniería en la sociedad en su conjunto? De hecho, los ingenieros han cambiado por completo el mundo en el que vivimos, desde casas modernas, puentes, viajes espaciales y automóviles hasta la última tecnología móvil. Las ideas innovadoras están en el corazón de lo que hacen los ingenieros, y utilizan su conocimiento para crear perspectivas nuevas y emocionantes y para resolver cualquier problema que pueda surgir.

La cuestión es que en este siglo la ingeniería es, más que nunca, una profesión global. El contexto en el que deben enmarcarse los problemas que resuelve la ingeniería es cada vez más global, y la sostenibilidad global debe tomarse como un criterio ingenieril importante. Pero la ingeniería todavía está lejos de ser culturalmente inclusiva. Ha habido una tendencia preocupante a que el alcance global y el impacto de la ingeniería se basen esencialmente en perspectivas de países desarrollados. Por eso es que se debe recuperar el término globalización como algo que implica la celebración de una rica diversidad, no como una receta para una dominación esencialmente neocolonial, desde una perspectiva extraída de una o dos regiones, por poderosas que sean.

La medida en que las cuestiones multiculturales e internacionales deben tenerse en cuenta en la práctica de la ingeniería plantea interrogantes sobre la disposición en que los asuntos culturales impregnan la educación ingenieril. Sin embargo, no es claro que los avances en la educación superior en general apoyen necesariamente una variedad de perspectivas. De hecho, un grupo de fuerzas e ideas que promueven un mercado educativo global parece tener una influencia cada vez mayor en los debates nacionales e internacionales. Las universidades tradicionales, incluso cuando extienden su alcance internacional, pueden mantenerse cada vez más solo para los grupos de élite, mientras que surge un tipo de formación en el sótano de la negociación para las masas a nivel de cada país, incluso en regiones enteras. El asunto es que esta especie de arreglo será desastroso tanto socialmente como profesionalmente para los ingenieros.

En todas las latitudes estos profesionales ofrecen contribuciones útiles al desarrollo de una perspectiva más amplia de la ingeniería. El contexto ingenieril en el que trabajan los estudiantes y académicos ha permitido, en una amplia gama de enfoques innovadores, experimentar y dar voz a esa diversidad cultural. Esta variedad incluye algunos enfoques que las universidades han adoptado para incorporar temas internacionales y conciencia transdisciplinar en los programas. De ahí la necesidad de capacitar a los estudiantes de ingeniería para que reflexionen sobre cuestiones globales, de modo que, como individuos, sean culturalmente sensibles e inclusivos y puedan enorgullecerse justificadamente del papel internacional de su profesión.

Mirando primero a la profesión en sí, la academia debe defender firmemente que los ingenieros reclamen la idea de la globalización como un término culturalmente inclusivo, y a la ingeniería global como una actividad culturalmente inclusiva. Esto es necesario, porque gran parte del contexto político para la práctica global de la ingeniería en el siglo XXI está siendo establecido por tres construcciones esencialmente ideológicas, y que son centrales en la retórica del capitalismo moderno: 1) globalización, 2) racionalismo económico (neoliberalismo), y 3) gerencialismo corporativo. Realmente, estos conceptos solo pertenecen al sector empresarial, donde definen cada vez más el entorno de trabajo para muchos profesionales de la ingeniería. Sin embargo, se están introduciendo en todas las esferas de la vida social y política, incluidas las universidades.

Por otro lado, la sustentabilidad quizás demuestra más claramente la dimensión global de los desafíos que enfrentan los ingenieros. Avanzar hacia la sostenibilidad es una preocupación fundamental para las sociedades de todo el mundo. Lo que significa exactamente la sostenibilidad es todavía un tema de discusión, pero algunos de los recursos centrales y otros temas están comenzando a surgir con cierta claridad. Ayudar a las personas a satisfacer sus necesidades, sin comprometer los recursos disponibles para las generaciones futuras, es parte de la historia. Existe un acuerdo menos generalizado sobre la medida en que es necesario mantener la biodiversidad y conservar los entornos naturales y construidos. La adopción de la sostenibilidad, como un principio rector para la práctica profesional de la ingeniería, requerirá

ciertamente un replanteamiento exhaustivo de los enfoques actuales, lo mismo que una exploración mucho más seria de los problemas futuros.

La sostenibilidad no es simplemente un concepto técnico, aunque los ingenieros deben desempeñar un papel clave para lograr sus demandas técnicas. Si buscáramos que todos en la tierra logren la calidad de vida promedio de los millones de ciudadanos de los países industrializados, tendríamos que aumentar la eficiencia de los recursos y utilizarlos muy sustancialmente. Los estudios indican que, mediante un uso más eficaz de las tecnologías existentes, en muchas áreas se podría lograr un aumento de hasta cuatro veces en la eficiencia del uso de recursos. Sin embargo, el pensamiento reciente sugiere que se necesita un factor más cercano a 10, pero, de hecho, esto requerirá un cambio radical y planteará grandes desafíos para los sistemas de ingeniería.

Otra área en la que la ingeniería global tiene un papel positivo que desempeñar es en el desarrollo y la transferencia de tecnología. Durante décadas, gran parte de la práctica de la ingeniería ha sido el desarrollo de nuevas tecnologías en un contexto industrial, lo mismo que su transferencia, adaptación y adopción en otros lugares y culturas. Una de las dificultades para analizar el desarrollo y la transferencia de tecnología es la enorme variedad de sistemas socio-técnicos de producción y uso involucrados. En un extremo de la gama se encuentran las actividades a pequeña escala, a menudo en áreas remotas, y problemas como las comunicaciones, la purificación de agua potable o la producción artesanal y agrícola para grupos pequeños. En el otro extremo están las actividades industriales a gran escala, con las que, generalmente, los ingenieros están más familiarizados (y quizás más cómodos). Todo el espectro de la transferencia de tecnología es importante, pero los enfoques requeridos en cada extremo del mismo son muy diferentes, y es esencial tener claro dónde está el foco en todo momento.

La transferencia de tecnología tiene aspectos tanto culturales como técnicos y de recursos. Incluso en los traslados a países relativamente desarrollados, estos problemas culturales pueden presentar serias dificultades. Al considerar los aspectos culturales de la transferencia de tecnología, se puede distinguir entre contextos micro, por ejemplo, dentro de una empresa individual, y contextos macro, que pueden incluir una sociedad regional o nacional completa, o incluso el mundo entero. Se sugiere entonces que, para desarrollar una comprensión adecuada de las causas y consecuencias de desarrollos tecnológicos específicos, debe tenerse en cuenta a las dimensiones culturales.

Para resumir este análisis de los constructos actuales y posibles de la ingeniería global, en esta coyuntura parece obvio que el término tiene connotaciones y potencialidades tanto positivas como negativas. La profesión del ingeniero tiene una responsabilidad ética fundamental para ayudar en los movimientos locales, nacionales, regionales y globales hacia una sociedad más social y ecológicamente sostenible. Los criterios de diseño en todos los niveles deben cambiar para tener en cuenta la sostenibilidad como un criterio de diseño fundamental, y esto requiere un cambio fundamental de enfoque, tanto educativo como técnico.

De esto es que trata el contenido de este libro, de una ingeniería global y sostenible que guie a la sociedad en su tránsito por el Nuevo Orden Mundial. Los autores de cada capítulo plasman sus pensamientos acerca de muchas de estas cuestiones, tan necesarias en la actual situación del Planeta, ofreciendo una perspectiva global de la ingeniería para el mundo, y no para atender al neoliberalismo imperial. Las investigaciones desde las que se generan los capítulos aquí incluidos son de carácter transdisciplinar, ya que esta deberá ser la manera en que se desarrolle la ingeniería en la Nueva Era que estamos viviendo.

Contenido

Prólogo	4
<i>Revisión de los impactos en la calidad del agua subterránea generados por humedales artificiales en zonas rurales</i>	10
Laura Victoria Navarro Arriola, Juan Esteban Torres Agudelo y Carlos Alberto Riveros Jerez	
<i>Evaluación de la eficiencia de biofiltros artesanales para la remoción de la carga contaminante en aguas grises</i>	25
Víctor Alfonso Ramírez L., Alan Ernesto Garrido R., Leidy Tatiana Caviedes C. y Ángela Patricia Munares B.	
<i>Evaluación y caracterización del contenido de microplásticos en el estiércol de ganado caprino</i>	36
Clara Lizzette Puentes García, Deisy Lorena Ramos Chala y Paula Martínez Silva	
<i>Efectos de la vegetación en cañones urbanos en relación con la contaminación atmosférica generada por material particulado</i>	46
Tomás Vargas Montes y Carlos Alberto Riveros Jerez	
<i>Modelación ecológica integrada para el apoyo en la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico. Un Caso de estudio</i>	62
Stephanie Lugo Rodríguez, Javier E. Holguín González y Oscar Ascuntar-Osnas	
<i>Desarrollo de un aplicativo para observar el comportamiento de la calidad de aire basado en valores de PM2.5 en una red de monitoreo</i>	82
Walter Pardavé Livia y Edwar Mauricio Sánchez Galvis	
<i>Incidencia de la movilidad de las personas en la concentración de material particulado PM2.5 en una zona residencial urbana</i>	90
Ángel Alejandro Rodríguez-Aya y John Alejandro Figueredo-Luna	
<i>Determinación de la energía geotérmica hidrotermal y los impactos ambientales en el departamento de Caldas, Colombia</i>	97
Tatiana Pérez Gosteva, Mariana Sabogal Correa y Juan Pablo Vaquiro Ramírez	
<i>Análisis de variables físicas relacionadas con taludes de tierra</i>	109
Tatiana Pérez Gosteva y Mayra Alejandra Gómez Moreno	
<i>Evaluación ambiental de medidas y tecnologías para la disminución del consumo de energía eléctrica</i>	120
Johanna Andrea Celis Campos	
<i>Impacto de la gestión del riesgo en las instituciones de salud: Una revisión de literatura</i>	136
Natalia García Corrales, Elisa del Carmen Navarro R., Luisa Fernanda Pastrana F. y Óscar Mauricio Gelves	
<i>Aplicación de la metodología lean manufacturing para reducir el tiempo de producción de bolas de maní</i>	151
Luis Fernando Pedraza Ruiz, Marlén Ordóñez Medina y Diana Marcela Quintero	
<i>Propuesta para la optimización de un proceso productivo a partir de Value Stream Mapping VSM</i>	165
Nidia Stella Rincón Parra y Sonia Patricia Garzón Martínez	
<i>Evaluación y mitigación de los riesgos biomecánicos y de utilización de metodologías Lean para mejorar las condiciones laborales: Una revisión sistemática de la literatura</i>	173
Elisa del Carmen Navarro R., Magda Viviana Monroy S., Diego Fernando Sánchez Z., Luis Villarreal López y Christian Ricardo Zea Forero	
<i>Aplicación de un modelo de ruteo de vehículos de dos eslabones para mejorar el proceso de aprovisionamiento y distribución en una cadena de suministros agroindustrial</i>	188
José Ruiz-Meza, Yessica V. Quiroga-Bárceñas, María C. Vásquez-Monterroza y Gean Mendoza	
<i>Análisis de caso de la gestión turística para la construcción de instancias requeridas en el diseño de itinerarios de viaje</i>	198
José Ruiz-Meza, Ana Castro-Vergara, Jairo Martínez Banda y Jairo R. Montoya-Torres	

<i>Mejoramiento de la calidad administrativa mediante una estrategia de articulación del plan de gobierno local con la norma GTC -ISO 18091:2019</i>	208
Hernando Camacho C., Sara Inés Castaño G., Sandra Patricia López Z. y Cindy Julieth Moscoso C.	
<i>Utilización de modelos agregados en procesos de manufactura dentro del sector automotriz</i>	220
Alejandro Mateos C., Mariana Ruíz M., Erick Guillermo Torres B. y María Teresa Torres G.	
<i>Aplicación de métodos de evaluación de riesgo biomecánico en el contexto empresarial: Una revisión de la literatura</i>	236
Mauren Natalia Marín Castro, Heyder Jhonnied Useche Cubides y Magda Viviana Monroy Silva	
<i>Proceso de optimización de producción a través de la gestión de operaciones: Caso de estudio en una empresa cementera</i>	251
Lloyd Herbert Morris Molina, Juan Luis Arias Vargas, Olga Jasmin Salazar Herrera y Homero Murzi	
<i>Análisis a la intención de compra y de consumo de medicamentos genéricos de los habitantes de una ciudad colombiana</i>	265
Paola Velásquez León, Javier Hernández Cáceres y Juan C. García-Ojeda	
<i>Configuración de una red de prestadores de servicios en salud para zonas urbanas utilizando herramientas de programación matemática</i>	273
Juan José Hernández-Sánchez y Edgar Leonardo Duarte-Forero	
<i>Modelo para los procesos logísticos de suministro y distribución de medicamentos oncológicos</i>	289
Pablo César Franco Vásquez, Cristhian Stiven Valencia Serna y Sebastián Rojas Leal	
<i>Fases propuestas para el diseño y construcción de un modelo de Gestión del Conocimiento</i>	306
Luciano Nicolás Straccia, Adriana Maulini Buño, Cecilia Ramacciotti y María Florencia Pollo-Cattaneo	
<i>Diseño de un modelo de indicadores para cuantificar los valores CERT de la cultura BPM desde la perspectiva de eficiencia y eficacia. Parte 3</i>	320
Claudia Yadira Rodríguez Ríos, Cristian Alejandro Quintero Bocanegra y Cristian Camilo Quinto Torres	
<i>Diseño de un modelo para la Gestión del Conocimiento con enfoque BPM</i>	336
Claudia Yadira Rodríguez Ríos, Jhon Alejandro Lasso Buesaquillo y Andrés Julián Gutiérrez Oviedo	
<i>Resultados de una revisión sistemática de la literatura acerca de la transformación digital en el sector de alojamiento y hospedaje</i>	344
Helien Parra Riveros y Daniela Alejandra Trujillo Zapata	
<i>Los ovoproductos como oportunidad de innovación en el sector avícola</i>	357
Angie Carolina Galindo Mora y Yamile Adriana Jaime Arias	
<i>Los Sistemas de Información Geográfica SIG en el estudio de las variaciones en los patrones de ordenamiento y estructura espacial del paisaje en Medellín en las últimas cuatro décadas</i>	371
Olgalicia Palmett-Plata, Ana Sofía Henao-Tamayo y Jaime García-Leal	
<i>Métricas para el proceso de despliegue de sistemas software: Un mapeo sistemático</i>	386
Pablo Daniel Vázquez, Marisa Daniela Panizzi y Roberto Alfredo Bertone	
<i>Estrategia didáctica instruccional OVA para la disminución del estrés en estudiantes universitarios bajo la pandemia Covid-19</i>	397
Edgardo Muñoz Beltrán, Mery González Delgado, Jhony Cruz R., María Inés Mantilla P. y Delvis Mejía Álvarez	
<i>Análisis de la sinergia entre la analítica del aprendizaje y el diseño del aprendizaje: Un estudio de mapeo sistemático</i>	405
Iris Inés Sattolo, Marisa Daniela Panizzi, Vanesa Contreras y María Alejandra Valensise	
<i>Método de mejora continua de Interfaces gráficas de usuario en aplicación web a través de sistemas inteligentes</i>	415
Oswaldo Germán Fernández, Pablo Pytel y María Florencia Pollo-Cattaneo	

<i>Utilización de IoT en el diagnóstico temprano del Covid-19</i>	429
Juan David Corso Medina y Leonardo Juan Ramírez López	
<i>Aplicación de la dinámica de sistemas en la estructuración de una herramienta de toma de decisiones</i>	442
Angie Lizeth Fajardo O., Nicolás Andrés Ovelencio P., Javier Fernando Niño V. y Edwin Andrés Niño V.	
<i>Protocolo para el cálculo científico distribuido sobre clientes móviles indeterminados en una Mobile Ad hoc Networks MANET</i>	460
Pablo Iuliano, Luis Marrone y Fernando Tinetti	
<i>Arquitectura de solución para un Sistema de Información de seguridad radiológica en medidores nucleares</i>	480
Andrea Sánchez G., Jesús Enrique Londoño S., John Willian Branch B., Juan Guillermo Ramírez G., Yonatan Zuleta O. y Carolina Osorio C.	
<i>Aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de aplicaciones que hacen gestión gráfica</i>	498
Edwin Insuasty Portilla y Jesús Insuasty Portilla	
<i>Inclusión del adulto mayor en la era digital a través de herramientas tecnológicas enfocadas en teléfonos inteligentes</i>	515
Edisney García P., Eilen Lorena P., María F. Gasca C., Michael Herzen Conde G. y Nicolás Alberto Ibarra G.	
<i>Generación semi-automática de un glosario de conceptos para la construcción de una conceptualización unificadora en el dominio de liderazgo</i>	526
Carlos Mauricio Zuluaga R., Manuela Gómez S., José Soto M., Julio Cesar Chavarro P. y Sandra Estrada M.	
<i>Fomento de aprendizajes para el cuidado profesional de enfermería mediante el uso de tecnologías</i>	543
Delvis Mejía Á., María Inés Mantilla-P., Feliz Javier Villero M., Doris Marina Cerchiaro-F. y Edgardo Muñoz B.	
<i>Utilización de las redes neuronales artificiales para el control y estimación de parámetros en accionamientos y sistemas eléctricos</i>	551
Verena de Jesús Mercado Polo, Lizeth Dayane Cortes Hernández y Alonso de Jesús Retamoso Llamas	
<i>Optimización del proceso de autorizaciones para servicios de salud a afiliados mediante la automatización de la gestión del correo electrónico</i>	567
David Leonardo Navas Arenas y Yamile Adriana Jaime Arias	
<i>Retos de las facultades de ingeniería para formar y capacitar a los profesionales en un siglo de cambios permanentes</i>	585
Omar Iván Trejos Buriticá	
<i>Diseño de un aplicativo para capturar señales bioeléctricas y encefalográficas en miembros superiores</i>	593
Fabián David Barreto S., Nicolás Rodríguez D., Cristian David Sánchez B. y Cesar Andrey Perdomo C.	
<i>Implementación de gráficos de control sintéticos para el análisis estadístico de los datos en la HAS-200 mediante el desarrollo de un software</i>	603
Gustavo Andrés Campos-A., Astrid Carolina Lezama M., Ángel Felipe Rueda M. y Gloria Stefanny Rubiano V.	
<i>SACUW: Una herramienta software para analizar el comportamiento y usos de redes WiFi</i>	615
Francisco Clemente Valle D., Mauricio Alonso V. y Nicolás Zambrano Rodríguez	
<i>Diseño y construcción de un algoritmo para el análisis deductivo y evaluación de la cinemática de los gestos deportivos de saque y remate de jugadores de voleibol</i>	624
Hugo Armando Talledos R., Marco Javier Suarez B. y Yolanda Torres Pérez	
<i>Extracción de características Histograma de Gradientes Orientados HOG para la identificación de vehículos en imágenes usando Máquina de Soporte Vectorial SVM</i>	639
Ricardo Alirio González B., Carolina Acevedo N., Alexander Marroquín O., Sandra Milena García Á. y Paola Andrea Mateus A.	

<i>Diseño y aplicación de una herramienta para identificar y clasificar motocicletas mediante una red neuronal convolucional</i>	652
Sandra Milena García Á., Cristian Alexander Vega C., José Vicente Cadena L., Ricardo Alirio González B. y Paola Andrea Mateus A.	
<i>Análisis a las potencialidades de uso de los recursos tecnológicos en procesos de enseñanza-aprendizaje</i>	663
Gabriela Bohórquez Ramírez y Alexandra María Silva Monsalve	
<i>Algoritmo de clasificación de daños en carreteras utilizando aprendizaje profundo</i>	674
Diego Alejandro Rodríguez Salamanca	
<i>Fusión de datos para información descentralizada: Una revisión del estado del arte</i>	680
Juan Pablo Vélez Uribe y Fernán Alonso Villa Garzón	

Revisión de los impactos en la calidad del agua subterránea generados por humedales artificiales en zonas rurales

Laura Victoria Navarro Arriola¹
Juan Esteban Torres Agudelo²
Carlos Alberto Riveros Jerez³
Universidad de Antioquia
Colombia

Los humedales artificiales CW son considerados como uno de los sistemas descentralizados más adecuado para las soluciones de depuración de agua en áreas rurales, donde también son utilizados para el tratamiento de aguas residuales agrícolas y ganaderas. Los CW se diseñan teniendo en cuenta los procesos naturales que se dan en los humedales por medio de la capacidad de aprovechamiento de las plantas, el suelo saturado o zonas húmedas y poblaciones microbianas asociadas al tratamiento de aguas residuales. En este capítulo se hace una revisión del estado del arte del funcionamiento, tipología de los CW y las interacciones entre aguas superficiales SW y aguas subterráneas GW, se incluye también el reconocimiento y análisis de las interacciones CW-GW y, con base en estas interacciones, se presenta la selección de los impactos más relevantes generados en la calidad del GW. Por medio de esta revisión sistemática se pudo evidenciar que los CW tienen alto rendimiento y altas tasas de eliminación en la remoción de contaminantes. Sin embargo, la concentración de contaminantes en el agua superficial de los CW se incrementa con el funcionamiento a largo plazo de los mismos, y se agudiza con la sedimentación y la descomposición causadas por el mal manejo de las plantas del humedal y posibles factores humanos asociados al mantenimiento de esos sistemas. Teniendo en cuenta que el GW y el SW no son componentes aislados del sistema hidrológico, es muy probable que los procesos de contaminación que impactan los CW incidan en la calidad del recurso hídrico subterráneo. Este trabajo de revisión proporciona información relevante sobre los posibles impactos en la calidad del agua subterránea generados por la implementación de humedales artificiales en zonas rurales de Colombia, zonas donde se requiere sistemas de saneamiento descentralizados que garanticen la conservación del recurso hídrico.

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental.
Contacto: victoria.navarro@udea.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Ambiental.
Contacto: jesteban.torres@udea.edu.co

³ Profesor Asociado Facultad de Ingeniería.
Contacto: carlos.riveros@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable y el saneamiento básico son elementos fundamentales para garantizar la calidad de vida de cualquier sociedad, el desarrollo económico de sus pobladores y la sostenibilidad de los recursos naturales. Uno de los Objetivos del Desarrollo del Milenio ODM planeó que al año 2015, el porcentaje de personas que no tenían acceso sostenible al agua potable y así mismo a servicios básicos de saneamiento alrededor del mundo sería reducido a la mitad [1]. No obstante, para cumplir esta meta se tuvo en cuenta un enorme reto, pues SEGÚN la Organización Mundial de la Salud OMS y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia UNICEF, la cobertura rural en servicios de saneamiento se ha dado en menor proporción que la cobertura urbana, muestra de ello, es que en promedio se registran más de tres habitantes de zonas rurales sin servicios de saneamiento por cada habitante de zonas urbanas sin los mismos servicios [2].

Para entender la naturaleza del problema, es preciso tener claro el concepto de saneamiento y las características que se deben tener en cuenta para categorizar una región como predominantemente rural. Según la OMS, se entiende por saneamiento *el suministro de instalaciones y servicios que permiten eliminar sin riesgo la orina y las heces... también hace referencia al mantenimiento de buenas condiciones de higiene gracias a servicios como la recogida de basura y la evacuación de aguas residuales* [3]. Por otro lado, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OCDE [4], para clasificar una región como predominantemente rural hay que tener en cuenta dos características: 1) áreas que presentan una densidad de población inferior a 150 habitantes por kilómetro cuadrado; o 2) áreas donde más del 50% de su población vive en unidades locales rurales.

En 2015, en Latino América y el Caribe menos del 20% de la población rural tenía acceso a conexiones de alcantarillado e instalaciones de saneamiento mejoradas *in situ* [5]. Actualmente existen sistemas de saneamiento inadecuados e inseguros en muchas partes del mundo, especialmente en zonas rurales de países de ingresos bajos y medios, y teniendo en cuenta los retos técnicos y los costos de los sistemas de saneamiento [3], se ha considerado el uso de sistemas descentralizados como las soluciones de saneamiento más adecuadas para las regiones rurales, dado que son diseñados para operar cerca de los hogares, a pequeña escala y no requieren grandes inversiones; y en ciertas ocasiones, se considera la posibilidad de reutilizar el efluente [6]. En este sentido, es importante mencionar los Humedales Artificiales CW, los cuales son usados para el tratamiento de aguas residuales desde la década de 1950 [7].

Los humedales artificiales se diseñan con el fin de imitar el proceso natural y las zonas de los humedales (Figura 1), y debido a la capacidad de aprovechamiento de las plantas y el suelo saturado o zonas húmedas, se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas y en algunos casos para las industriales. Estos sistemas actúan como un micro ecosistema, compuesto por agua, la cual circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación; los sustratos sirven de soporte a la vegetación y la fijación de la población microbiana, lo que ayuda en los procesos de eliminación de los contaminantes; por otra parte, las plantas acuáticas o macrófitas, estas a su vez ayudan a la filtración, oxigenación del sustrato, eliminación de nutrientes, controlan el crecimiento de algas y adsorción de los contribuyentes del agua residual.

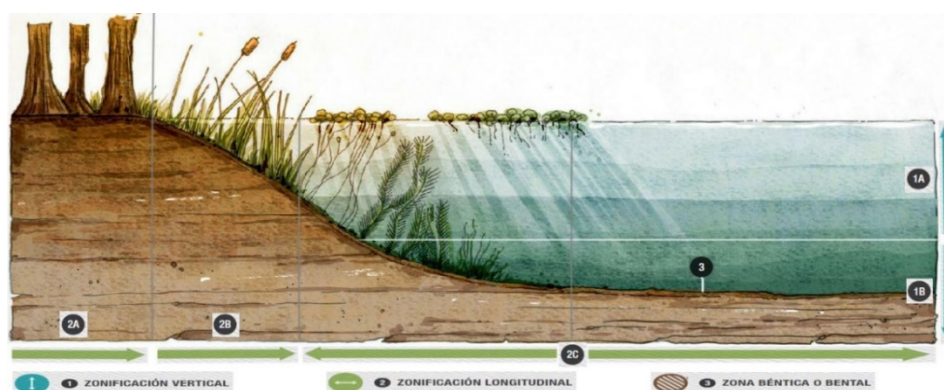


Figura 1. Zonas del humedal: 1A: Estrato fótico (2A: Zona terrestre, 2B: Zona ribereña o riparia); 1B: Estrato afótico (2C Izquierda: zona litoral, 2C Derecha: zona limnética (adaptada de [10])

El funcionamiento de los CW está fundamentado bajo tres principios básicos: la actividad bioquímica, contribución de oxígeno por medio de las plantas y apoyo físico de un lecho inerte que ayuda al enraizamiento de los vegetales [8]. Los CW funcionan de acuerdo a un régimen de flujo, pueden ser de agua libre superficial FWS-CW o de flujo subterráneo SSF-CW. Los SSF-CW se clasifican en flujo subsuperficial horizontal HSSF-CW y flujo subsuperficial vertical VSSF-CW. En los FWS-CW, el agua está expuesta directamente a la atmósfera y esta fluye a través de los tallos de las plantas, el fondo del humedal está sellado para evitar la infiltración de las aguas residuales a los acuíferos y son pocos profundos; estos se inundan desde la parte superior y el agua fluye horizontalmente sobre el humedal, desarrollando una profundidad de columna de agua de aproximadamente 200 - 400 mm o hasta 800 mm. La aplicación más común de los FWS-CW es para el tratamiento avanzado de efluentes de procesos de tratamiento secundario o terciario. Las aguas residuales se tratan mediante procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación [9].

En los HSSF-CW, el agua no es visible y la circulación se realiza a través de un medio granular y grava, donde también se fija la vegetación, estos humedales tienen baja incidencia en los malos olores, eliminación de compuestos de nitrógeno y carbono por la alta oxigenación, la exposición de las personas y la aparición de insectos es menor debido al flujo subterráneo [8]. En los HSSF-CW, el agua pasa horizontalmente desde la entrada hasta la salida debajo del sustrato poroso y las raíces de las plantas, y su profundidad varía entre 300 y 800 mm, se debe tener en cuenta que la profundidad del sustrato depende del tipo de macrófitas y su profundidad de enraizamiento, con una pendiente que oscila entre 1 y 3%. Los VF-CW fueron desarrollados en Europa con el fin de proporcionar niveles más altos de transferencia de oxígeno, produciendo así un efluente nitrificado. Se pueden combinar con HSSF-CW o FWS-CW para generar trenes de tratamiento de nitrificación-desnitrificación. Este tipo de humedales se utilizan a menudo para el tratamiento descentralizado de aguas residuales.

En contraste, los humedales artificiales de flujo horizontal HF tienen procedimientos más fáciles de construir y operar, pero tienen una menor capacidad de nitrificación. Actualmente se presenta el uso generalizado de tres tipos de humedales: 1) los humedales de superficie de agua libre FWS tienen áreas de agua abierta y son similares en apariencia a los pantanos naturales, 2) humedales de flujo subsuperficial horizontal HSSF, que emplean un lecho de grava plantado con vegetación de humedal. El agua fluye horizontalmente desde la entrada hasta la salida debajo de la superficie del lecho, y 3) los humedales de flujo vertical VF distribuyen el agua a través de la superficie de un lecho de arena o grava plantado con vegetación de humedal. El agua se trata a medida que se filtra a través de la zona de la raíz de la planta [9]. Cabe mencionar el caso particular de Bolivia, país que tiene municipios con un alto porcentaje de población rural. Allí se ha propuesto a los humedales artificiales como una solución para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y debido a las condiciones áridas y semiáridas de algunas zonas agrícolas, se considera el uso de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura y la recarga de aguas subterráneas [8]. Precisamente es necesario tener en cuenta que el agua subterránea desempeña un papel importante en el ciclo hidrológico, debido a las interacciones con el agua superficial y su uso como fuente para el abastecimiento de agua [11, 12].

Generalmente, la calidad y la ecología de las aguas subterráneas poco profundas son controladas por entradas como precipitaciones y filtraciones [13] por interacciones agua-roca [14] y ciclos biogeoquímicos [15]. Sin embargo, se han identificado dinámicas de flujos transitorias y multidireccionales, las cuales comprenden aguas subterráneas de recarga localizada, que fluyen por la zona de aireación, y en gran medida, invierten los patrones de la zona freática, dicha interacción entre las dinámicas que se dan dentro de la zona de drenaje y la zona freática genera una redistribución significativa (p.ej. oxígeno, nitrato), que incluso supera la *cubierta protectora* de los estratos arcillosos gruesos al conducir sustancias de origen superficial a los recursos de aguas subterráneas profundas [16].

El agua subterránea y el agua superficial no son componentes aislados del sistema hidrológico [17], se ha evidenciado que en casi todos los lugares alrededor del mundo, el agua superficial (ríos, lagos, embalses, humedales, etc.) interactúa con el agua subterránea. Las interacciones se dan con la pérdida de agua superficial a agua subterránea, la filtración de agua subterránea a masas de agua superficial o una combinación de ambas [18]. Es claro entonces que, en caso de presentarse procesos de contaminación que impacten cuerpos hídricos superficiales, se terminaría afectando la calidad del recurso hídrico subterráneo.

Por lo tanto, es necesario comprender los principios básicos de las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial (GW-SW sus siglas en inglés) para lograr una gestión eficaz de los recursos hídricos [17]. En muchas ocasiones se convierte en todo un desafío, el hecho de determinar hasta qué punto las interacciones GW-SW puede darse en un entorno particular y evaluar sus impactos potenciales en las SW, las GW y la zona de transición.

La zona de transición GW/SW es una región debajo del fondo de un cuerpo de agua superficial donde se presentan condiciones de cambio, pasando de un sistema dominado por agua subterránea a un sistema dominado por agua superficial al interior del sustrato. Dicha región incluye tanto la interfaz entre el agua subterránea y el agua superficial como la región más amplia en el sustrato, donde se mezclan el agua subterránea y el agua superficial. La zona de transición o zona hiporreica HZ no es solo un área donde se mezclan las aguas superficiales y subterráneas, sino también un área ecológicamente activa debajo de la interfaz sedimento/agua donde pueden ocurrir importantes condiciones y procesos ecológicos y fisicoquímicos (Figura 2) [19].

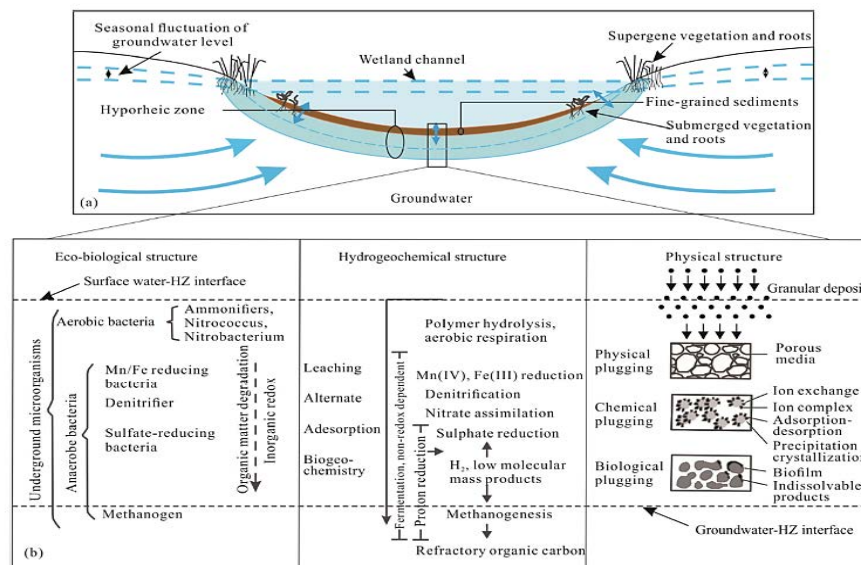


Figura 2. Sitios y procesos principales de interacciones SW-GW en humedales. (a) El alcance de la HZ de los humedales (la línea continua y la línea de puntos representan el límite de la HZ durante el nivel de agua alto y el nivel de agua bajo, respectivamente). Los sedimentos de grano fino y las raíces de la vegetación perturbando la estructura de la HZ del humedal; (b) los procesos ecobiológicos, hidrogeoquímicos y físicos en la HZ [21].

La HZ puede variar tanto espacial como temporalmente; y su *extensión funcional* se define en términos del problema de gestión que se desea abordar (cantidad, calidad del agua o problemas del ecosistema acuático). Identificar la conectividad hidrológica, la geología y las características químicas de la zona de transición entre SW y GW es fundamental para determinar qué interacciones GW-SW son relevantes en un entorno específico. La zona de transición incluye los materiales del subsuelo que pueden alterar el flujo, al igual que las condiciones y características biogeoquímicas y ecológicas del agua que fluye de GW a SW (o viceversa). Diferentes factores influyen en las interacciones GW-SW, entre estos se tienen el tipo de cuerpo de agua superficial y factores geomorfológicos, hidrológicos, topográficos, geológicos, químicos, biológicos, ecológicos y climatológicos que pueden variar tanto espacial como temporalmente.

Algunos esquemas de clasificación se centran en los procesos de flujo y, en ocasiones, incluyen los conceptos de dirección de flujo en la interfaz GW-SW (ganando, perdiendo o fluyendo) y conectividad GW-SW (conectada o desconectada). Conant et al., (2019), desarrollaron un marco para conceptualizar las interacciones del agua subterránea y el agua superficial e identificar los impactos potenciales sobre la calidad del agua, la cantidad de agua y los ecosistemas. El marco consta de una serie de diagramas que permiten hacer una evaluación holística de un sistema GW-SW y facilita el desarrollo de un modelo conceptual que puede usarse para probar hipótesis aplicables [20]. La dinámica de las interacciones GW-SW de los humedales está altamente controlada por los niveles de agua subterránea y superficial, que pueden variar significativamente en el corto plazo.

En contraste, a largo plazo, se pueden dar cambios en las interacciones GW-SW en caso de presentarse cambios abruptos en los niveles de agua inducidos por factores como el cambio climático [16], cambios de uso de la tierra (remoción de vegetación nativa para agricultura de secano, riego, silvicultura, desarrollo urbano, etc.) y cambios en los regímenes de flujo de las aguas superficiales debido a la regulación, canalización, extracción hídrica aguas arriba, etc. [21]. En Colombia y en muchos países alrededor del mundo, no es un procedimiento práctico o económico, la instalación de redes de alcantarillado en zonas rurales bajo los criterios de la hidráulica universal, por lo tanto, se ha recurrido a soluciones descentralizadas de saneamiento como pozos sépticos, letrinas, campos de infiltración o soluciones sanitarias individuales [22] y humedales artificiales CW, los cuales en la práctica funcionan como un componente de un sistema híbrido o de varias etapas, con el fin de garantizar altos porcentajes en la remoción de contaminantes [23].

Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios), para el año 2019, en el país se tenían registrados 9.839.434 suscriptores del servicio de alcantarillado. Con base en el caudal depurado en los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales STAR en el 2019, equivalente a 31,50 m³/s y el número de suscriptores de alcantarillado para el mismo año, se obtiene un porcentaje de aguas residuales tratadas del 48,56% [22]. Teniendo en cuenta estas cifras y aspectos planteados en el Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales PMAR, en Colombia más del 50% de las aguas residuales se vierten directamente en los ríos, convirtiéndose en la principal fuente de contaminación de aguas superficiales [24].

Es preciso tener en cuenta que los datos contenidos en el PMAR aplican exclusivamente para un contexto urbano; con respecto a la cobertura del servicio público de alcantarillado en zonas rurales, esta apenas alcanzó el 14,36% en el año 2018; no obstante, en general para las zonas rurales, la prestación del servicio de alcantarillado no se ejecuta con el sistema de tuberías y conductos convencionales, en lugar de este, se usan soluciones descentralizadas de saneamiento o soluciones alternativas individuales, las cuales no son objeto de vigilancia de la Superservicios. A pesar de estas cifras poco alentadoras, el bajo porcentaje en la cobertura de alcantarillado (14,36%) no indica una carencia generalizada de soluciones de saneamiento en zonas rurales del país, dada la implementación de soluciones alternativas y descentralizadas para la disposición de residuos líquidos [25], previamente mencionadas.

En años recientes, el incremento de los costos ambientales asociados al tratamiento de aguas residuales ha despertado un especial interés en la investigación enfocada al diseño de nuevas tecnologías, que propendan por un ahorro energético y económico [26]. En ese sentido, los CW han sido considerados elementos de la infraestructura verde, dado que pueden proveer soluciones de bajo costo para múltiples servicios ecosistémicos y bienestar humano [23]. La mayoría de los humedales artificiales que se han construido en Colombia son de flujo subsuperficial, y han sido destinados principalmente a la ejecución de pruebas piloto para el tratamiento de agua residual doméstica, con caudales y poblaciones de diseño relativamente pequeñas [27].

Los CW son uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales menos costosos de operar y mantener, debido al aprovechamiento de las *energías ambientales naturales* (sol, viento, suelo, plantas y animales) que permiten la ocurrencia de procesos de transformación y estabilización de la materia orgánica; haciendo que se requiera una mínima cantidad de energía de combustibles fósiles y químicos para cumplir con los objetivos del tratamiento. En los CW se han utilizado especies de plantas emergentes similares a las encontradas en los humedales naturales. Las especies de macrófitas más usadas son: la totora o enea (*Typha* sp.), la caña común o junquillo (*Phragmites communies*) y los juncos (*Juncus* sp. y *Carex* sp.), espadaña (*Scirpus* sp.) [9]. Las especies de plantas más resistentes y adaptables al clima tropical de Colombia que han registrado los mejores resultados son la *Typha* sp seguida del *Junco* sp [28].

En el barrio Los Muiscas, localizado en la ciudad de Tunja se construyó un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal HSSF-CW, como elemento de un sistema de tratamiento que incluía previamente un reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA; dicho sistema operó entre los años 1997 y 1999. Se destacan las siguientes especificaciones: tiempo de retención hidráulica TRH que oscilaba entre 0,9 y 3 días, caudal promedio (Q_{prom}) equivalente a 2,2 m³/día, la vegetación usada para el tratamiento fue el junco

(*Typha domingueis*). Se registraron las siguientes eficiencias promedio en la remoción de demanda química de oxígeno [29]:

- DQO: 51,7%, demanda bioquímica de oxígeno
- DBO₅: 45,1%, nitrógeno total
- TN: 15,0%, fósforo total
- TP: 31,0%, sólidos suspendidos totales
- SST: 88,6%, y sólidos totales
- ST: 22,5%

En [30] presentaron el funcionamiento, en su etapa inicial, de un HSSF-CW diseñado para operar en la planta piloto de la Estación Experimental Javeriana en el municipio de Cogua, Cundinamarca, con el objetivo de tratar las aguas residuales domésticas generadas en las viviendas y las aulas de dicha universidad. Este humedal fue diseñado para cinco habitantes fijos, estimando un caudal promedio de 1,34 m³/d y una DBO₅ esperada a la entrada de 132 mg/l (afluente) y una descarga prevista de 44 mg/l (efluente). El reactor diseñado consistió en una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0,6 m, el tiempo de retención hidráulica fue de 1,5 días aproximadamente y una carga hidráulica de 0,23m/d. Con este sistema se alcanzaron remociones de DBO₅, que oscilaron entre el 66% y el 80%, TN entre el 30% y el 70%, TP alrededor del 28%; SST, entre el 44% y el 90% [30].

En la Escuela Colombiana de Ingeniería *Julio Garavito* ubicada en Bogotá, se construyó y monitoreó bajo la modalidad de prueba piloto, un HSSF-CW usando carbón mineral y una vegetación macrófita de tipo ornamental, alcatraz o cala (*Zantedeschia aethiopica*) [29], esta especie se seleccionó debido a su fácil manipulación y adquisición en el área de estudio y porque resultaba *estéticamente agradable*. La densidad de siembra fue de 14 plantas/m². El humedal trató un caudal promedio de 0,096 m³/día, con un tiempo de retención hidráulica de 4 días. Se registraron remociones promedio superiores al 85% tanto para la turbiedad como los SST, y para la DQO y DBO₅ fueron 70% y 52% respectivamente [27].

En la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, con sede en Medellín, se hizo la evaluación de un CW de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución. Se instalaron dos tanques trapezoidales de acrílico con las siguientes dimensiones: largo 1,1 m, base menor 0,4 m, base mayor 0,6 m y 0,6 m de profundidad con una inclinación del 1%. Con respecto a la vegetación, se usaron individuos de las especies *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus* (una especie para cada uno de los tanques), porque se encuentran adaptadas a las condiciones climáticas del lugar de estudio. El caudal recibido por ambos CW fue de 0,015 m³/día, con un TRH teórico de 9 días. Los mayores porcentajes de remoción de DQO (70,4%), DBO₅ (96,7%) y SST (81,4%) se consiguieron en el humedal que contenía la especie *T. latifolia* [31].

Finalmente, es necesario tener en cuenta que las interacciones GW-SW en los humedales difieren de la de los lagos, debido a la facilidad con la que el agua se mueve a través de sus lechos. Generalmente, la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial es bastante lenta, dado el alto contenido de materia orgánica en los sedimentos de los humedales; no obstante, el intercambio de agua superficial con el agua contenida en los poros de los sedimentos de humedales es bastante fuerte, debido a la presencia de plantas con raíces fibrosas [18]. Con la masificación y aplicación generalizada de los CW como sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, se ha dado un incremento gradual en la investigación sobre la conexión hidráulica entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, haciendo especial énfasis en el intercambio químico y la conexión hidroquímica que se da entre ríos o humedales artificiales y las aguas subterráneas; evidenciando que la calidad del agua de los CW puede estar estrechamente ligada a la calidad de las aguas subterráneas poco profundas [21].

En este contexto, con esta propuesta se realiza una revisión sistemática de la literatura y del estado del arte de humedales artificiales, comprendiendo su funcionamiento y tipologías, al igual que reconociendo las interacciones GW-SW que se presentan en este tipo de sistemas, con el fin de identificar los posibles impactos en la calidad del agua subterránea generados por la operación de humedales artificiales usados como sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales de Colombia.

2. MÉTODO

El objetivo principal de la revisión es complementar el conocimiento que se tienen en la actualidad del funcionamiento de los humedales artificiales en el contexto nacional con el fin de identificar las interacciones SW-GW. Por tal motivo, el trabajo de revisión se compone de tres fases:

1. En la primera fase, se identifica el funcionamiento y la tipología de los humedales artificiales, documentando previamente las características propias de los humedales naturales, resaltando la importancia de los procesos que se dan en la zona de transición o zona hiporreica. Se realiza una breve descripción del uso de los CW para el tratamiento de ARD y la relación entre CW, GW y calidad del agua y también se reconocen inicialmente las interacciones SW/GW.
2. En la segunda fase, se categorizan, describen y analizan los procesos asociados a las interacciones CW/GW, y a la par, se identifican los posibles impactos de acuerdo a cada tipo de interacción con el objetivo de seleccionar reacciones químicas involucradas en los procesos previamente categorizados (Tabla 1).
3. En la tercera fase, se plantea la discusión (análisis de resultados) con base en el caso de estudio llevado a cabo en Xiantao, China entre 2012 y 2018, en el cual abordaron la eficiencia de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y el riesgo para las aguas subterráneas que representa dicho sistema contrastando estos resultados con el estado del arte de los humedales artificiales en Colombia por cuanto en el contexto nacional no se han desarrollado estudios detallados como el desarrollado en Xiantao, China.

Tabla 1. Reacciones involucradas en los procesos físicos, químicos, geoquímicos y biológicos que se tienen en cuenta para el reconocimiento y análisis de las interacciones CW-GW

	Reacción	Descripción	Fuente
1	$CO_{2(g)} + H_2O \rightleftharpoons CO_{2(ac)}$	Formación de dióxido de carbono acuoso debido a la hidrólisis del dióxido de carbono gaseoso	[34]
2	$CO_{2(ac)} + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$	Formación del ácido carbónico debido a la hidrólisis del dióxido de carbono acuoso	
3	$CH_2O + 3CO_2 + H_2O + 2MnO_2 \Rightarrow 2Mn^{2+} + 4HCO_3^-$	Reducción del manganeso, del ion mangánico al ion hipomanganeso ($Mn^{4+} \rightarrow Mn^{2+}$)	[38]
4	$2MnO_2 + CH_2O + 4H^+ \Rightarrow 2Mn^{2+} + CO_2 + 3H_2O$		
5	$CH_2O + SO_4^{2-} \Rightarrow H_2S + 2HCO_3^-$	Reducción de sulfato (respiración de sulfato)	[40]
6	$4H_2 + CO_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$	Formación del metano (metanogénesis)	
7	$Fe^{2+} + 0.25O_2 + H^+ \Rightarrow Fe^{3+} + 0.5H_2O$	Oxidación ion ferroso a ion férrico	[38]
8	$Fe^{3+} + H_2O \Rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$	Hidrólisis del ion férrico (producto hidróxido férrico)	
9	$Fe^{3+} + 2H_2O \Rightarrow FeOOH + 3H^+$	Hidrólisis del ion férrico (producto oxi-hidróxido férrico)	[41]
10	$2Mn^{2+} + 2H_2O + O_2 \Rightarrow 2MnO_2 + 4H^+$	Oxidación del manganeso	
11	$H_2O + CO_2 + CaCO_3 \rightleftharpoons Ca[HCO_3]_2 \rightleftharpoons H^+ + CaCO_2$	Alcalinidad en aguas naturales	[38]
12	$NH_4^+ + 1.5O_2 \Rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$	Reacción intermedia de la nitrificación	[38]
13	$NO_2^- + 0.5O_2 \Rightarrow NO_3^-$	Reacción intermedia de la nitrificación	
14	$NH_4^+ + 2O_2 \Rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$	Nitrificación= ecuación (9) + ecuación (10)	[9]
15	$5CH_2O + 4NO_3^- \Rightarrow 2N_2 + 4HCO_3^- + CO_2 + 3H_2O$	Desnitrificación (respiración de nitrato)	
16	$CH_2O + 0.5NO_3^- + H^+ \Rightarrow CO_2 + 0.5NH_4^+ + 0.5H_2O$	Amonificación de nitratos	[9]
17	$CH_2O + O_2 \Rightarrow CO_2 + H_2O$	Respiración aeróbica	
18	$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2 + 38ADP + 38P \Rightarrow 6CO_2 + 12H_2O$	Producción de ATP	[9]

3. RESULTADOS

3.1 Posibles impactos en la calidad del agua subterránea GW asociados a los procesos físicos en la zona hiporreica o zona de transición

- *Contaminación del GW con trihalometanos (THM):* Un incremento en la temperatura promedio acelera el intercambio de agua y la descomposición del carbono orgánico en los sedimentos, generando mayores cantidades de dióxido de carbono CO₂, metano CH₄ o carbono orgánico disuelto DOC, dependiendo de las condiciones edáficas [21]; precisamente, el *carácter aromático* de la concentración de DOC es un factor relevante para determinar el potencial de formación de subproductos de desinfección DBPs en las aguas subterráneas [32]. Los subproductos de desinfección DBP, también llamados trihalometanos

THM, que se forman cuando el cloro y el bromo interactúan con materiales orgánicos naturales en el agua [33]. La tasa de formación de THM es afectada por la concentración de cloruros, la concentración de bromuros, el pH y la temperatura [32]. Es posible entonces prever la posible *contaminación del GW con THM, impidiendo el uso del agua para consumo humano*.

- *Modificación del pH:* Las especies químicas que componen el sistema de carbonatos: dióxido de carbono acuoso- $\text{CO}_2(\text{ac})$, dióxido de carbono gaseoso $\text{CO}_2(\text{g})$ (reacción 1), ácido carbónico H_2CO_3 (reacción 2), bicarbonato HCO_3^- , carbonato (CO_3^{2-}) y sólidos que contienen carbonato *comprenden uno de los principales sistemas de ácido-base conjugado en aguas naturales* [34]. La calidad del agua es modificada por las diferentes interacciones que se dan en el ciclo hidrológico y también debido a los siguientes procesos: evaporación, transpiración, absorción selectiva por la vegetación, oxidación/ reducción, intercambio iónico, disociación de minerales, precipitación de minerales secundarios, mezcla de aguas, lixiviación de fertilizantes y estiércol, contaminación y procesos biológicos [35]. En la estructura física de los humedales se presentan reacciones asociadas al intercambio iónico, complejo iónico, adsorción y desorción, las cuales generan el taponamiento químico de dicha estructura [21]. El intercambio iónico se puede utilizar para reducir la alcalinidad del agua (desalcalinización del agua mediante intercambio iónico) [36]. En este contexto, es posible que *altere el pH del GW*.

3.2 Posibles impactos en la calidad del agua subterránea GW asociados a los procesos químicos en la zona hiporreica o zona de transición

- *Acidificación del GW:* La mezcla de agua subterránea reducida y agua superficial oxidada da como resultado una secuencia de reducción de oxígeno a reducción de nitrato, reducción de manganeso (reacciones 3 y 4), reducción del sulfato (reacción 5), y como consecuencia se presenta la metanogénesis en el perfil del suelo (reacción 6) [37]. El proceso descomposición anaerobia de la materia orgánica puede resultar inestable, en el caso de la entrada de sobrecargas orgánicas o nitrogenadas, o también debido a la presencia de productos inhibidores (inhibidores enzimáticos como medicamentos) [20]. En caso de presentarse *episodios de inhibición* se tendrá como resultado la *acidificación del GW*, debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles AGV [39].
- *Alteraciones en las concentraciones de manganeso Mn, hierro Fe o hierro total:* La oxidación de Fe (II) a Fe (III) y la posterior hidrólisis, produciendo hidróxido férrico $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ u oxi-hidróxido férrico FeOOH (reacciones 7, 8 y 9) se da espontáneamente en la presencia de oxígeno, pero esta reacción depende en gran medida del potencial de oxidación Eh y el pH [32]. Los microorganismos reductores de Fe y Mn pueden disolver óxidos insolubles de iones férrico (Fe^{3+}) y mangánico (Mn^{4+}), liberando iones ferrosos (Fe^{2+}) e hipomanganeso (Mn^{2+}) solubles en el agua. También pueden liberarse otros metales ligados a las formas oxidadas. Por tanto, estos microorganismos pueden tener incidencia sobre el destino de otros metales contaminantes mediante la reducción enzimática directa y la reducción indirecta catalizada del ion Fe^{2+} y del ion Mn^{2+} de origen biológico. En muchas ocasiones es muy difícil determinar la participación bacteriana en la oxidación de los iones manganesos (reacción 10), debido a la adsorción de iones Mn^{2+} a partículas de MnO_2 y la posterior autooxidación de los iones Mn^{2+} adsorbidos [38]. El hierro y el manganeso no tienen efectos en la salud de los consumidores; pero ambos elementos manchan la ropa y los aparatos sanitarios, y cuando se agota el oxígeno propician la formación de compuestos que se depositan, corroen y obstruyen tuberías y equipos mecánicos [41].

3.3 Posibles impactos en la calidad del agua subterránea GW asociados a los procesos biogeoquímicos /químicos

- *Alcalinización del GW:* Los procesos que se presentan cuando aguas de diferente calidad entran en contacto entre sí o con diferentes sedimentos, incluyen: 1) las reacciones ácido-base que pueden causar la disolución y precipitación de minerales como el carbonato de calcio (CaCO_3), 2) formación de complejos de metales con carbono orgánico disuelto o intercambio de iones (por ejemplo, Ca^{2+} y Mg^{2+} disueltos intercambiados por Na^+ , 3) adsorción / desorción (por ejemplo, sorción de $\text{PO}_4\text{-P}$ a minerales de óxidos metálicos), y 4) difusión impulsada por gradientes de concentración [20]. La alcalinidad se caracteriza por la presencia de los iones hidroxilo OH^- , carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) [34]. En

las aguas naturales la alcalinidad se debe a la presencia de iones CO_3^{2-} y HCO_3^- , los cuales ingresan al agua debido a la acción del CO_2 sobre los materiales naturales del suelo (reacción 11) [41]. Por lo tanto, es posible prever la posible *alcalinización del GW*, debido al aumento de las concentraciones de los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- . Es preciso tener en cuenta que, la alcalinidad es importante en el análisis de la calidad del agua porque en altas concentraciones le confiere un sabor desagradable al agua [41].

- *Modificación del flujo de nutrientes al GW*: Diferentes investigaciones han demostrado la eficacia de los humedales en el tratamiento de GW contaminadas, mostrando que los nitratos y las materias orgánicas (benceno, NH_4^+ , etc.) pueden tener altas tasas de remoción del agua subterránea debido a las interacciones GW-SW [42, 43]. Por otro lado, las concentraciones promedio de Nitrógeno Total Kjeldahl TKN y NH_4^+ , suelen aumentar con las interacciones GW-SW. El aumento de las concentraciones de N se debe principalmente al incremento de N orgánico y NH_4^+ , [44]. El incremento de las concentraciones de N orgánico se presenta por la descomposición de la materia orgánica que se acumula en el CW y su posterior filtración hacia aguas subterráneas poco profundas [45]. Dado que la zona de transición tiene el potencial de ser una zona importante de mezcla y reacciones biogeoquímicas (redox, ácido-base, precipitación, sorción, etc.), se pueden provocar cambios en la calidad del agua, por ejemplo, *modificación del flujo de nutrientes al GW*.
- *Alteraciones en la evolución de la química del GW*: El ciclo biogeoquímico del nitrógeno es complejo, debido a las múltiples transformaciones bióticas y abióticas que involucran siete estados de valencia (+5 a -3). Diferentes procesos bioquímicos y físico-químicos están involucrados en la transformación de una fuente de N en otra. Las formas inorgánicas de N más importantes son: el amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), nitrógeno molecular N_2 y óxido nitroso N_2O [38]. Por otro lado, las concentraciones promedio de fósforo total TP, fosfatos (PO_4^{2-}) y sulfatos (SO_4^{2-}) en el agua subterránea tienden a disminuir con las interacciones GW-SW [44], [45], [46]. Sin embargo, en casos particulares se puede registrar un contenido excesivo de fósforo P en el GW, en parte por la infiltración de P desde la superficie del suelo del humedal al agua subterránea y también debido a que algunos CW no cuentan con una capa anti-filtración, lo que facilita el intercambio de P entre el SW y el GW, con el consecuente incremento de la concentración de P en el GW [20]. *El comportamiento biogeoquímico del nitrógeno, fósforo y azufre derivados de los humedales tiene un impacto negativo en la evolución de la química de las aguas subterráneas* [21].
- *Reducción riesgo de eutrofización del GW*: Los procesos de conversión más importantes que operan en un sistema de humedales son: amonificación (N orgánico $\rightarrow NH_4^+$), nitrificación ($NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$) (reacciones 12, 13 y 14), desnitrificación ($NO_3^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$) (reacción 15), fijación biológica ($N_2 \rightarrow N$ orgánico), amonificación de nitratos ($NO_3^- \rightarrow NH_4^+$) (reacción 16), oxidación anaeróbica del amonio (ANAMMOX, $NH_4^+ \rightarrow N_2$) y volatilización ($NH_4^+ \rightarrow NH_3$) [38]. Los CW utilizados para la purificación del agua son altamente efectivos en la eliminación de N y P, en gran medida, debido a la absorción de nutrientes por parte de la vegetación [47]. Demostrando que posiblemente se puede *reducir el riesgo de eutrofización en las aguas subterráneas* que están interactuando con las aguas superficiales de un CW; aunque también se debe tener presente el riesgo de contaminación por fósforo en las GW poco profundas, contaminación que se puede presentar por la infiltración de fósforo desde la superficie del suelo del humedal al agua subterránea [46].
- *Reducción o cambios mínimos en la concentración de Sólidos Suspendidos Totales TSS*: En los diferentes tipos de CW las plantas, los animales, los microorganismos y el medio ambiente interactúan para mejorar la calidad del agua, con las interacciones de dichos elementos se logra reducir o eliminar contaminantes (materia orgánica, materia inorgánica, elementos orgánicos traza y los patógenos del agua) mediante mecanismos como sedimentación, adsorción y precipitación química, interacciones microbiológicas, crecimiento de la vegetación, etc., que disminuyen las concentraciones de sólidos suspendidos totales TSS, demanda bioquímica de oxígeno BOD, N, P y patógenos; demostrando la importancia de los CW para el mejoramiento de la calidad del agua, porque se pueden usar particularmente para la remoción de sólidos suspendidos SS [48]. Diferentes estudios han demostrado que todas las tipologías de CW tienen una alta eficiencia para la remoción de TSS, algunos llegando a una eliminación del 99% [6, 38, 48-52]. Teniendo en cuenta las altas tasas de remoción de SS en CW, se puede prever una reducción o

cambios mínimos en la concentración de TSS del GW, generando un posible impacto positivo en la calidad de la misma.

3.4 Posibles impactos en la calidad del agua subterránea GW asociados a los procesos biológicos

- *Reducción riesgo de eutrofización del GW:* Hay organismos que reducen compuestos inorgánicos como el nitrito (NO_2^-), el sulfato (SO_4^{2-}) o dióxido de carbono CO_2 para utilizarlos como nutrientes, este caso, se denomina metabolismo asimilatorio [53]. La recolección frecuente de la biomasa en los sistemas CW favorece las tasas de absorción de N y P por parte de las plantas macrófitas [9, 54]; por lo tanto, se registra una mayor eliminación de nutrientes en estos sistemas descentralizados. En las macrófitas, el tejido vegetal aéreo tiene como función el almacenamiento de nutrientes; en contraste, el tejido vegetal sumergido y las raíces y rizomas en el sedimento se encargan tanto de la absorción de nutrientes como de la liberación de oxígeno, la cual aumenta la degradación de la materia orgánica y la nitrificación [38]. La capacidad de adsorción de N por parte de las plantas se da en función de las formas de nitrógeno (N). Generalmente, el amonio (NH_4^+) es el sustrato de N preferido por la vegetación, porque es más reducido energéticamente que el nitrato (NO_3^-) [55], evidenciando que el almacenamiento y la absorción del N en las macrófitas, depende de la forma en la cual dicho elemento ingresa al CW (NH_4^+ o NO_3^-). Los procesos de remoción de compuestos orgánicos (aquellos que contienen C, N, P y S) se encuentran estrechamente ligados a la actividad microbiana y están controlados por la disponibilidad de oxígeno (reacción 17) y el potencial redox del suelo, ambos regidos por la hidrología [49]. Los CW utilizados para la purificación del agua son altamente efectivos en la eliminación de N y P, esto se presenta principalmente por la absorción de nutrientes por parte de la vegetación [47]; por ello es posible *reducir el riesgo de eutrofización de las aguas subterráneas* que están interactuando con las aguas superficiales de un CW.
- *Acidificación del agua:* Muchas de las reacciones que se dan en los humedales están mediadas por microorganismos. Gran parte de las transformaciones químicas más relevantes realizadas por microorganismos están controladas por enzimas y proteínas *genéticamente específicas*, las cuales actúan como catalizadores de las reacciones químicas. Con el metabolismo microbiano se descomponen los carbohidratos en ácido pirúvico con la producción neta de dos moléculas de ácido pirúvico y dos moléculas de adenosín trifosfato ATP por cada molécula de glucosa y luego se presenta la descomposición del ácido pirúvico a través de la fermentación o la respiración. Cabe destacar que la fermentación inducida por fosforilación a nivel del sustrato no requiere oxígeno, lo cual permite la formación de una variedad de productos finales como ácido láctico, etanol y otros ácidos orgánicos [9]. La fosforilación a nivel de sustrato SLP se refiere a la formación de adenosín trifosfato ATP a partir de adenosín difosfato ADP y un compuesto intermedio fosforilado, en lugar de ADP y fosfato inorgánico Pi, como se da en la fosforilación oxidativa [56]. Por otro lado, la respiración aeróbica se define como el proceso de reacciones bioquímicas mediante las cuales los carbohidratos se descomponen en CO_2 , agua y energía, específicamente 38 moléculas de ATP por cada molécula de glucosa completamente oxidada (reacción 18). Bajo estas condiciones, se puede presentar *acidificación del agua*, en caso de registrarse altas concentraciones de ácido láctico, etanol u otros ácidos orgánicos producidos mediante la fosforilación a nivel del sustrato.
- *Reducción en el riesgo por contaminación microbiológica del GW:* Existen alrededor de 60 especies conocidas de patógenos que afectan a los humanos y son transmitidos por el agua. Estos incluyen virus (como el rotavirus), bacterias (como *Vibrio cholerae* y *Escherichia coli*), protozoos (como *Cryptosporidium parvum*) y parásitos eucariotas multicelulares (como el gusano de Guinea o *Dracunculus medinensis*). Los CW como *ecosistemas amigables con el medio ambiente* han sido aplicados ampliamente para el control de contaminación e incluso para la reducción de bacterias fecales y de patógenos humanos [51]. El desempeño de los CW en la remoción de patógenos depende de un *efecto sinérgico* de diferentes factores ambientales (luz solar, temperatura del agua, vegetación, etc.), de diseño (tiempo de retención hidráulica, flujo subsuperficial y sobre carga orgánica) y operativos (sedimentación, filtración mecánica, adsorción, acumulación de lodos, etc.) [57]. Los CW son una alternativa de tratamiento eficaz para la eliminación e inactivación de patógenos en las aguas residuales. Se han alcanzado eficiencias de eliminación de patógenos superiores al 99,99% empleando diferentes tipos de humedales artificiales [58]. Los organismos patógenos se eliminan por sedimentación, depredación, filtración mecánica,

mortalidad natural (relacionada con la temperatura y/o la química del agua), interacción de la biopelícula, exposición a biocidas y radiación ultra violeta [9], [58], [59]. Es posible que la eliminación de patógenos y especies indicadoras en CW sea afectada principalmente por el tiempo de retención hidráulica (HRT sus siglas en inglés). A mayor HRT mayor eficiencia en la remoción de patógenos [57]. Evidentemente, el tratamiento de aguas residuales domésticas en CW puede representar reducciones en parámetros como coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos totales, lo cual implica una reducción significativa en el riesgo por contaminación microbiológica del GW.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este trabajo de revisión proporciona información sobre los posibles impactos en la calidad del agua subterránea generados por humedales artificiales en zonas rurales de Colombia, con respecto al marco teórico y estado del arte relacionados con la tipología y funcionamiento de CW y las interacciones aguas subterráneas-aguas superficiales GW-SW que se presentan en este tipo de sistemas descentralizados usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los estudios adelantados en Colombia abordan aspectos de diseño (dimensiones, caudal, HTR, profundidad efectiva, entre otros), funcionamiento y porcentajes de remoción de carga contaminante, generalmente expresa como DQO, DBO₅, TN, TP y SST; destacando valores de remoción de la DQO de cuarenta y cinco puntos porcentuales (45%), y para la DBO₅ estos valores promedian los cincuenta y seis puntos porcentuales (56%) aproximadamente.

La mayoría de los CW construidos en el país han sido de flujo subsuperficial horizontal, usando vegetación resistente y adapta a las condiciones climáticas tropicales y en algunos casos seleccionada por su disponibilidad en la zona de estudio y por razones estéticas; algunas de estas especies son la Plantilla (*Musa Velutina*), el Junco (*Scirpus holoschoenus*), Rascadera o Bore (*Alocasia macrorrhiza*) y la Enea (*Thypha Latifolia*). Estos CW han sido utilizados en pruebas piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas, teniendo en cuenta una población y un caudal promedio relativamente bajos; por ejemplo, el HSSF-CW construido en Coagua- Cundinamarca, fue diseñado para cinco habitantes fijos, estimando un caudal promedio de 1,34 m³/d y para el caso del campo petrolero de Caño Gandul localizado en Casanare, este fue diseñado para 12 empleados fijos y un caudal de 12 m³/d [60]. Revisando el estado del arte de estos sistemas en Colombia, evidenciamos que generalmente los CW se implementan como componente de un tren de tratamiento de aguas residuales; encontramos elementos de pretratamiento como cribado, trampa de grasas, tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), entre otros.

Con el presente trabajo de revisión, advertimos que en Colombia no se han adelantado estudios relacionados con las interacciones GW-SW en CW; como el caso de estudio llevado a cabo en Xiantao (China), en el cual se estimó la eficiencia de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y el riesgo para la calidad del agua subterránea que representa dicho sistema. El sistema tenía dos etapas de pretratamiento compuestas por dos tanques de sedimentación y dos estanques de oxidación. Las dimensiones del CW eran 5000 m largo y 300 m de ancho y vegetación estaba constituida principalmente por cálamos y juncos. La tasa de degradación del nitrógeno amoniacal NH₃-N es la más alta, seguida de TP y TN; en contraste, la tasa de degradación de la DQO es la más lenta. La concentración de contaminantes varía con la distancia de flujo de las aguas residuales domésticas, esto se demuestra con la eficiencia de remoción relativamente baja en el sitio de 600 m; en contraste desde los 4000 a 4800 m, la eliminación de contaminantes en el CW se mejora significativamente.

Mediante el análisis del caso de estudio previamente mencionado, se pudo notar que la eficiencia de este sistema usado para el tratamiento de aguas residuales domésticas, se reduce a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento. En este caso de estudio se contemplaron dos posibles causas para explicar el contenido excesivo de fósforo P en las GW; una es la infiltración de P desde la superficie del suelo del humedal, y la otra es la ausencia de una capa anti-filtración en el CW, entonces el SW de contenido fosforado se intercambia con el GW, aumentando el contenido de este elemento en esta última. La recolección frecuente de la biomasa en los sistemas CW favorece las tasas de absorción de N y P por parte de las plantas macrófitas [9, 54], por lo tanto, se registra una mayor eliminación de nutrientes en estos sistemas. Las macrófitas se consideran compartimentos de almacenamiento transitorio de nutrientes porque absorben nutrientes durante la temporada de crecimiento y liberan nutrientes en la senescencia [49]. *En las plantas,*

el término senescencia se utiliza para aludir al deterioro estructural y funcional que sufren muchos órganos en la fase terminal de su desarrollo [61]. Bajo estas condiciones, se debe reconsiderar el impacto positivo del riesgo de eutrofización del GW, generado por la reducción de compuestos inorgánicos como el fosfato (PO_4^{2-}) que usan algunos organismos como nutrientes (metabolismo asimilatorio) y la captación microbiana del fósforo. Los resultados del análisis de correlación lineal (Figura 3), muestran que la calidad del agua subterránea poco profunda se afecta por la concentración de DQO, NH_3-N , TN y TP en el agua superficial.

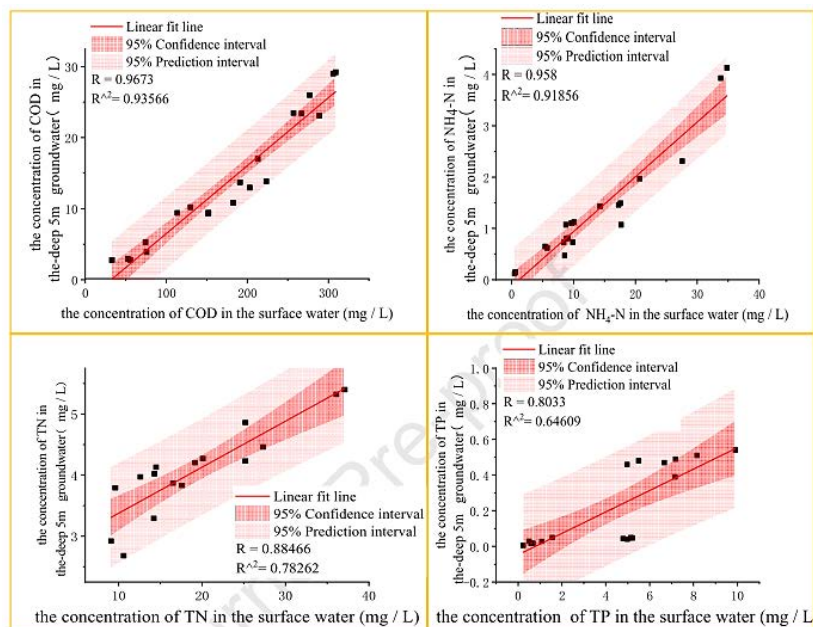


Figura 3. Análisis de correlación lineal de las concentraciones de DQO, DBO₅, TN y TP en las GW poco profundas en función de las concentraciones de estos mismos parámetros en el SW [46]

En este caso de estudio se registraron valores para la concentración de demanda química de oxígeno superiores a 10 mg/L, y la concentración de nitrógeno amoniacal alcanzo valores superiores a 1,5 mg/L. Según el estándar de la República Popular China para la calidad del agua subterránea, el NH_3-N excedió la concentración máxima aceptable; esto indica que cuando los humedales artificiales tratan las aguas residuales domésticas durante mucho tiempo, las aguas subterráneas poco profundas del humedal corren el riesgo de ser contaminadas.

5. CONCLUSIONES

Los CW se han convertido en una solución eficiente y económica para el tratamiento de aguas residuales domesticas en todo el mundo, especialmente en áreas rurales, remotas y en pequeñas poblaciones. En áreas rurales, los CW también pueden ser usados para el tratamiento de aguas residuales generadas en actividades ganaderas y agrícolas. Se ha evidenciado alta eficiencia en la remoción de contaminantes durante la etapa inicial (2-3 años) de operación de los CW para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Registrando tasas de eliminación de TN entre 30-94%, tasas de eliminación de TP que varían entre 28-90%, tasas de eliminación de DQO entre el 45-68% y de nitrógeno amoniacal del 95%.

La acumulación de contaminantes del agua en los CW, debido al funcionamiento a largo plazo de los mismos, sumada a la sedimentación y la descomposición causadas por el mal manejo de las plantas del humedal y posibles factores humanos, aumentan la concentración de contaminantes en el agua superficial de los CW. Con el reconocimiento y análisis de las interacciones SW-GW, se logra identificar que los procesos biogeoquímicos que se dan en los sedimentos acumulados debajo de casi todos los cuerpos de agua superficial, tienen un efecto muy marcado en la química del GW que ingresa al SW, así como en la química del SW que ingresa al GW.

Recordando que el GW y el SW no son componentes aislados del sistema hidrológico; es muy claro entonces que, en caso de presentarse procesos de contaminación que impacten los CW, se terminaría afectando la

calidad del recurso hídrico subterráneo. Muestra de ello es que los procesos biogeoquímicos involucrados en las interacciones CW-GW pueden alcalinizar el GW, modificar el flujo de nutrientes al GW, reducir el riesgo de eutrofización del GW (al menos en la etapa inicial de operación del CW) y generar una reducción o cambios mínimos en la concentración de TSS; y también es posible que se presente el riesgo de contaminación por P en las GW poco profundas, por la infiltración de P desde la superficie del suelo del humedal.

Diferentes procesos naturales (adsorción, infiltración, degradación microbiológica, entre otros) están involucrados en la fitorremediación que se lleva a cabo en los CW y también es importante reconocer el papel de la vegetación, los suelos y las comunidades microbianas asociadas al tratamiento de las aguas residuales domésticas en los humedales. Con la revisión documental, se identifica que en la HZ de los humedales se dan diferentes procesos físicos, químicos y biológicos debido a significativos gradientes físico-químicos. Los procesos físicos en la HZ pueden generar la contaminación del GW con THM y también pueden modificar el pH del agua. Por otro lado, los procesos químicos que tienen lugar en la HZ, pueden acidificar el GW debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y también es posible que se presenten alteraciones en las concentraciones de manganeso, hierro o hierro total por acción microbiana.

Los procesos biológicos asociados a la vegetación y comunidades bacterianas pueden minimizar las concentraciones de N y P tanto en la HZ como en el GW; reduciendo el riesgo de eutrofización. No obstante, se debe tener presente el riesgo de acidificación del agua, en caso de registrarse altas concentraciones de ácido láctico u otros ácidos orgánicos producidos mediante la fosforilación a nivel del sustrato. Finalmente, con base en las reducciones de parámetros como coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos totales que se registran en CW, se resalta la reducción significativa en el riesgo por contaminación microbiológica del GW.

REFERENCIAS

- [1] C. Useche Melo, "Agua y saneamiento rural. Oportunidades para la participación comunitaria en Colombia", Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D. C., Estados Unidos, Tech. IDB-TN-363, 2012.
- [2] Organización Mundial de la Salud y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, "La meta de los ODM relativa al agua potable y el saneamiento: El reto del decenio para zonas urbanas y rurales," 2007. Recuperado: https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/mdg_es.pdf
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Guías para el saneamiento y la salud," 2018. Recuperado: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/guia-de-saneamiento-resumen-ejecutivo.pdf?ua=1
- [4] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), "OECD regional typology", 2011. Recuperado: https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/OECD_regional_typology_Nov2012.pdf
- [5] Organización Mundial de la Salud (OMS) & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), "Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines," 2017. Recuperado: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258617/9789241512893-eng.pdf;jsessionid=E3292F17D13DDE98AA0A5A014CAF7276?sequence=1>
- [6] F. D. Moreira & E. H. Dias, "Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review", *Environmental Research*, vol. 190, pp. 1-11, 2020.
- [7] Y. Zhao, B. Ji, R. Liu, B. Ren & T. Wei, "Constructed treatment wetland: Glance of development and future perspectives", vol. 1, pp. 104-112, 2020.
- [8] A. Carvajal, C. Zapattini & C. Quintero, "Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia", *DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desa.*, vol. 5, pp. 88-108. 2018.
- [9] R. H. Kadlec & S.D. Wallace. *Treatment wetlands*, Segunda edición. New York: CRC Press, 2009.
- [10] U. Jaramillo, J. Cortés Duque & C. Flórez(eds.). *Colombia Anfibia. Un país de humedales. Volumen 1*. Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015, pp. 140.
- [11] S. M. Gorelick & C. Zheng, "Global change and the groundwater management challenge: Groundwater Management Challenge", *Water Resources Research*, vol. 51, pp. 1-61, 2015.
- [12] K.E. Bencala, M.N. Gooseff & B.A. Kimball, "Rethinking hyporheic flow and transient storage to advance understanding of stream-catchment connections", *Water Resources Research*, vol. 47, pp. 1-9, 2011.
- [13] H. Lin, "Earth's Critical Zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, pp. 25-45, 2010.
- [14] L. Daniele, A. Vallejos, M. Corbella, L. Molina & A. Pulido-Bosch, "Hydrogeochemistry and geochemical simulations to assess water-rock interactions in complex carbonate aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain), *Applied Geochemistry*, vol. 29, pp. 43-54, 2013.

- [15] K. A. Lohse, P. D. Brooks, J. C. McIntosh, T. Meixner, & T. E. Huxman, "Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems", *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 34, pp. 65-96, 2008.
- [16] R. Lehmann & K. U. Totsche. "Multi-directional flow dynamics shape groundwater quality in sloping bedrock strata", *Journal of Hydrology*, vol. 580, pp. 1-13, 2020.
- [17] M. Sophocleous, "Interactions between groundwater and surface water: The state of the science", *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 52-67, 2002.
- [18] H. Hasan Khan & A. Khan. *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science. Chapter 14 - Groundwater and Surface Water Interaction*. Amsterdam: ELSEVIER, 2019, pp. 197-207.
- [19] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), "Evaluating Ground-Water/Surface-Water Transition Zones in Ecological Risk Assessments," 2008. Recuperado: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/eco_update_08.pdf
- [20] B. Conant, C. E. Robinson, M. J. Hinton, & H. A. J. Russell, "A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems", *Journal of Hydrology*, vol. 574, pp. 609-627, 2019.
- [21] X. Wu, T. Ma & Y. Wang, "Surface Water and Groundwater Interactions in Wetlands", *Journal of Earth Science*, vol. 31, pp. 1016-1028, 2020.
- [22] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios), "Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2019", 2020. Recuperado: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/estudio_sectorial_de_los_servicios_publicos_domiciliarios_de_acueducto_y_alcantarillado_28_dic_rev_1.pdf
- [23] Y. Zhao, B. Ji, R. Liu, B. Ren, T. Wei, "Constructed treatment wetland: Glance of development and future perspectives", *Water Cycle*, Vol. 1, pp. 104-112. 2020.
- [24] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). *Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales Municipales en Colombia (PMAR)*. Bogotá, D.C: MAVDT, 2004, pp. 19.
- [25] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios), "Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018," 2029. Recuperado: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf
- [26] J. A. Rincón Medina, N.F. Millán Ballén, "Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Libre," 2013. Recuperado: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9997/EVALUACION%20DE%20UN%20HUMEDAL%20HSS%20PARA%20LA%20U%20LIBRE.pdf?sequence=1>
- [27] C. A. Díaz, "Tratamiento de aguas residuales a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil," 2014. Recuperado: <http://www.ustatunja.edu.co/cong/images/Articulos/TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20A%20TRAVES%20DE%20HUMEDALES.pdf>
- [28] I. Y. Estrada Gallego, "Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales," 2010. Recuperado: <https://core.ac.uk/download/pdf/71396135.pdf>
- [29] D. A. Rivera Vergara, "Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia". *Cuaderno Activa*, Vol. 7, pp. 99-107, 2015.
- [30] J. A. Lara Borrero & I. L Vera Puerto, "Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia," *Ingeniería y Universidad / Pontificia Universidad Javeriana*, vol. 9, no. 1, pp. 47-63, 2005.
- [31] J. C. Bedoya Pérez, A. N. Ardila Arias, J. Reyes Calle, "Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia," *Revista internacional de contaminación ambiental/ Universidad Autónoma de Tlaxcala*, vol. 30, no. 3, pp. 275-283, 2014.
- [32] J.A. Hopple, J. L. Barringer & J. Koleis, "Water-Quality Constituents, Dissolved-Organic-Carbon Fractions, and Disinfection By-Product Formation in Water from Community Water-Supply Wells in New Jersey, 1998-99," 2007. Recuperado: <https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5260/pdf/SIR2006-5260.pdf>
- [33] Center for Disease Control and Prevention (CDC), "Disinfection By-products (DBPs)," Environmental Health. Departamento de Salud y Servicios Humanos, Estados Unidos de América," 2009. Recuperado: https://www.cdc.gov/biomonitoring/pdf/THM-DBP_FactSheet.pdf
- [34] V. L. Snoeyink & D. Jenkins, *Water chemistry*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1980.
- [35] R. Thilagavath, S. Chidambaram, M. V. Prasanna, C. Thivya, C. Singaraja, "A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, southeast India," *Applied Water Science*, vol. 2, pp. 253-269, 2012.
- [36] D. C. Herrera, "Desalcalinización del agua mediante intercambio iónico," *Ingeniería Industrial/Universidad de Lima*, no. 31, pp. 221-238, 2013.
- [37] B. P. Wilcox, "Transformative ecosystem change and ecohydrology: ushering in a new era for watershed management," *Ecohydrology*, no. 3,6 pp. 126-130, 2010.

- [38] J. Vymazal & L. Kröpfelová, *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Berlin: Springer Science+Business Media, 2008.
- [39] S. Chiva Vicent, J. G. Berlanga Clavijo, R. Martínez Cuenca & J. Climent Agustina, "Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia" 2018. Recuperado: http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173363/Chiva_2018_Depuracion.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [40] G. Halla, P. Swash & S. Kotilainen, "The importance of biological oxidation of iron in the aerobic cells of the Wheal Jane pilot passive treatment system," *Science of the Total Environment*, vol. 338, no. 1-2, 2005.
- [41] C. A. Sierra Ramírez. *Calidad del agua- Evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U/Universidad de Medellín, 2011.
- [42] O. Coban, P. Kuschik, N. S. Wells, G. Strauch & K. Knoeller, "Microbial nitrogen transformation in constructed wetlands treating contaminated groundwater," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 17, pp. 12829-12839, 2014.
- [43] E. M. Seeger, P. Kuschik, H. Fazekas, P. Grathwohl & M. Kaestner, "Bioremediation of benzene-, MTBE- and ammonia-contaminated groundwater with pilot-scale constructed wetlands," *Environmental Pollution*, vol. 159, no. 12, pp. 3769-3776, 2011.
- [44] P. P. Schot & S. M. Pieber, "Spatial and temporal variations in shallow wetland groundwater quality," *Journal of Hydrology*, vol. 422-423, pp. 43-52, 2012.
- [45] Y. Ouyang, "Effects of a constructed wetland and pond system upon shallow groundwater quality," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 185, no.5, pp. 4245-4259, 2012.
- [46] H. Wu, X. Gao, M. Wu, Y. Zhu, R. Xiong & S. Ye, "The efficiency and risk to groundwater of constructed wetland system for domestic sewage treatment - A case study in Xiantao, China" *Jou. of Cleaner Production*, vol. 277, 2020.
- [47] M. J. Wassen, W. H. M. Peeters & H. Olde Venterink, "Patterns in vegetation, hydrology, and nutrient availability in an undisturbed river floodplain in Poland," *Plant Ecology*, vol. 165, no.1, pp. 27-43, 2003.
- [48] E. Kurzbaum, F. Kirzhner & R. Armon, "). Improvement of water quality using constructed wetland systems," *Reviews on Environmental Health*, vol, 27, no. 1, pp. 59-64, 2012.
- [49] H. Chen, "Surface-flow constructed treatment wetlands for pollutant removal: Applications and perspectives," *Wetlands*, vol. 31, no. 4, pp. 805-814, 2011.
- [50] S. Elfanssi, N. Ouazzani, L. Latrach & L. Mandi, "Phytoremediation of domestic wastewater using a hybrid constructed wetland in mountainous rural area," *Interna. Jou. of Phytoremediation*, vol. 20, no. 1, pp. 75-87, 2018.
- [51] S. Wu, D. Austin, L. Liu & R. Dong, "Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas," *Ecological Engineering*, vol. 37, no. 6, pp. 948-954, 2011.
- [52] F. Ye & Y. Li, "Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities," *Ecological Engineering*, vol. 35, no. 7, pp. 1043-1050, 2009.
- [53] R. Rodríguez, "Gestión y Tratamiento de Agua Subterránea Caso Planta Fraccionadora de Gas Polo Petroquímico Bahía Blanca," 2008. Recuperado: https://kupdf.net/download/agua-subt-polo-petr_59674b15dc0d603f56a88e82_pdf
- [54] H. Li, F. Liu, P. Luo, G. Xie, R. Xiao, W. Hu, J. Peng & J. Wu, "Performance of integrated ecological treatment system for decentralized rural wastewater and significance of plant harvest management," *Ecological Engineering*, vol. 124, pp. 69-76, 2018.
- [55] N, Zhou, S. Zhao & X. Shen, "). Nitrogen cycle in the hyporheic zone of natural wetland," *Chinese Science Bulletin*, vol. 59, no. 24, pp. 2945-2956, 2014.
- [56] J. Feher, "ATP Production I: Glúcolisis," *Quantitative Human Physiology/Academic Press*, pp. 171-179, 2012.
- [57] Y. Maiga, M. von Sperling, & J. R. Mihelcic, "Constructed Wetlands. In: J.B. Rose and B. Jiménez-Cisneros (eds)," *Ann Arbor: Michigan State University*, 2017.
- [58] K. P. Weber & R. L. Legge. *Pathogen removal in constructed wetlands*, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [59] S. Wu, P. N. Carvalho, J. A. Müller, V. R. Manoj & R. Dong, "Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators", *Science of the Total Environment*, vol. 541, pp. 8-22, 2016.
- [60] A. P. Otálora, "Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl," Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [61] D. Fanello, "Cambios estructurales y funcionales en las mitocondrias durante la senescencia de hojas y raíces," Tesis de Doctorado., Universidad Nacional de La Plata, Bs. As., Argentina, 2013.

Evaluación de la eficiencia de biofiltros artesanales para la remoción de la carga contaminante en aguas grises

Víctor Alfonso Ramírez Losada¹

Alan Ernesto Garrido Romero²

Leidy Tatiana Caviedes Cuéllar³

Ángela Patricia Munares Bautista⁴

Corporación Universitaria del Huila
Colombia

La investigación se desarrolló en una pequeña granja de la vereda Otás, municipio de Campoalegre, Colombia, donde las aguas grises son vertidas sin tratamiento a la quebrada de Otás, generando degradación en el ecosistema acuático y provocando riesgo por disponibilidad hídrica para las actividades agropecuarias de la zona. Esta situación llevó a buscar alternativas eficientes y de bajo costo en los procesos de tratamiento de las aguas grises, mediante el uso de biofiltros artesanales (filtración) y biorremediación con la especie *Chlorella vulgaris*. El objetivo fue evaluar la eficiencia de remoción de la carga contaminante presente en las aguas grises. Para tal efecto, se desarrollaron las fases: la primera consistió en construir 2 biofiltros con materiales de arena fina, cascarilla de arroz, tamo de arroz, bagazo de caña y grava dentro de tanques cilíndricos reciclados de 500 L; en la segunda, se determinó la eficiencia del sistema de tratamiento de las aguas grises, recolectando muestras de aguas para sus respectivos análisis de calidad por un laboratorio, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la Resolución 0631 de 2015, de la normatividad vigente en Colombia. El sistema funcionó bajo condiciones de temperatura ambiente promedio 28°C y las muestras de agua gris tratada se analizaron al día 6, día 14 y día 22. En conclusión, se logró eficiencia en el sistema de tratamiento, obteniendo remoción en fosfatos 89.08%, DQO 89.82%, grasas y aceites 99.98%, nitrógeno total 47.4%, sólidos sedimentables 99.74% y suspendidos totales 95.32%, valores que dan cumplimiento en la normatividad ambiental vigente. Los resultados indican que el uso de biofiltros artesanales y *Chlorella vulgaris* como mecanismo de biorremediación son tecnologías económicas y de fácil uso, que contribuyen con la remoción de carga contaminante de una pequeña granja para aguas grises.

¹ Ingeniero Ambiental y Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental.

Contacto: victor.ramirez@corhuila.edu.co

² Ingeniero Agrícola, Especialista en Gerencia de Negocios y Magíster en Ingeniería Civil y de Ciencias Ambientales.

Contacto: alan.garrido@corhuila.edu.co

³ Ingeniero ambiental.

Contacto: ltcaviedes@corhuila.edu.co

⁴ Ingeniero ambiental.

Contacto: apmunares@corhuila.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento indispensable para cubrir las necesidades de las actividades humanas y desarrollo económico, pero desafortunadamente por su uso se generan residuos tanto líquidos como sólidos que son vertidos directamente en las fuentes hídricas y en el suelo, generando problemas en la salud humana y deterioro y pérdida de los recursos en los ecosistemas [1, 2].

Una situación particular de contaminación son las aguas grises, provenientes de lavaplatos, lavamanos, lavadora, ducha y lavadero, representando el 75% del volumen de aguas residuales por el sector doméstico, además contienen residuos de alimentos, aceite, grasa, fibras de tela, pelo, jabones, detergentes, champús, crema de afeitar, arena y productos químicos; además la carga contaminante depende de factores socioeconómicos, actividades cotidianas y la cantidad de personas que habiten en las granjas o fincas [3, 4].

En la actualidad, el Centro Poblado Otás del municipio de Campoalegre, Huila, genera vertimientos de aguas grises en la quebrada Otás, situación que motivó a la realización del proyecto en una pequeña granja para el tratamiento de las aguas grises, su posible reutilización en cultivos de pan coger u otros fines. La eficiencia de remoción en el sistema de tratamiento de las aguas grises se ajustó a los parámetros exigidos por la Resolución 0631 del 2015, capítulo V, artículo 8, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS de Colombia, que establece los valores límites máximos permisibles y parámetros fisicoquímicos en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y no domésticas.

Por lo tanto, el proyecto diseñó y evaluó la eficiencia de biofiltros artesanales y el uso de microalga *Chlorella vulgaris* para remover la carga contaminante relacionada con materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes como nitratos y fosfatos. Los biofiltros se construyeron con materiales reciclados que son de fácil obtención, bajo costo de inversión e impacto ambiental positivo por la disminución de residuos. Adicionalmente, el uso de la especie *Chlorella vulgaris* es una alternativa que se ha utilizado en otras investigaciones, debido a la capacidad de remover cantidades significativas de NPK los cuales son utilizados por la especie como alimento [2, 5].

En la construcción de los dos (2) biofiltros se usaron tanques reciclados de 500 L, estos contenían diferente volumen de grava, tamo de arroz, bagazo de caña, cascarilla de arroz y arena fina, cuyas cantidades se ajustaron para influir en el sistema de tratamiento para la remoción de carga contaminante, lo que favorece social y ambientalmente a la quebrada Otás que es actualmente la receptora de aguas grises de la zona. Tratamiento que se convierte en una alternativa de saneamiento, factible, económica y amigable con el medio ambiente para la depuración de este tipo de aguas en comparación a otras tecnologías de tratamiento [6].

En [7] la investigación realizada logró reducir la concentración de la carga contaminantes en aguas residuales de tipo domésticas, mediante el diseño de un sistema de biopercolación, conformado por filtros percoladores a escala laboratorio. El proceso experimental consistió en la elaboración de 3 reactores, donde el fluido circulaba lentamente a través de lechos fijos (piedra pómez, concha negra y piezas de teclados), un tanque homogeneizador y un tanque de almacenamiento; finalmente, obtuvo resultados significativos, debido a que se logró determinar que el sistema de biofiltración empleado fue eficaz para la remoción de parámetros como DQO 89.3%, DBO5 95.7%, fosfatos 44.4%, nitrógeno total de 53.8%, turbidez 94.3% y pH de 7.5, siendo resultados óptimo para el tratamiento de agua residual doméstica, excepto por, el parámetro de conductividad en una reducción poco significativo.

2. MÉTODO

El presente estudio fue realizado en una pequeña granja ubicada en la vereda Otás del municipio de Campoalegre en el departamento del Huila, Colombia, la zona se ubica a una altitud de 694 msnm, en las coordenadas geográficas 2°36'16" N, 75°20'5" O, temperatura ambiente 28°C [8] y el predio tiene un área de 778m² (escritura pública No. 200-110299). Por otro lado, se empleó un equipo GPS de referencia eTrex 20x, para registrar las coordenadas geográficas que permitieron elaborar un plano actual de la situación de contaminación como se muestra en la Figura 1, se reconocieron 12 puntos de vertimientos de aguas grises

sin tratamiento sobre la quebrada Otás por las pequeñas granjas o viviendas, así mismo, se fijó el vertimiento No. 6 correspondiente al punto de muestreo de la pequeña granja del estudio de caso mencionado y lugar que se llevó a cabo la implementación del sistema de tratamiento.

El sistema de tratamiento de las aguas grises fue instalado en la parte posterior de la vivienda, allí existe una zona de pendiente que direcciona a la quebrada Otás (Figura 1), por lo tanto, los tanques cilíndricos reciclados de 500 L se instalaron de manera escalonada con el propósito de aprovechar la acción de la gravedad en el momento que el agua residual circulará por cada biofiltro o etapa del sistema. Asimismo, la tubería que se conectó entre cada tanque fue diseñada para que genere un flujo descendente, así aumentar el tiempo de retención hidráulica, los materiales tuvieron mayor periodo de contacto con agua a tratar y evitar la saturación en cada etapa del proceso.

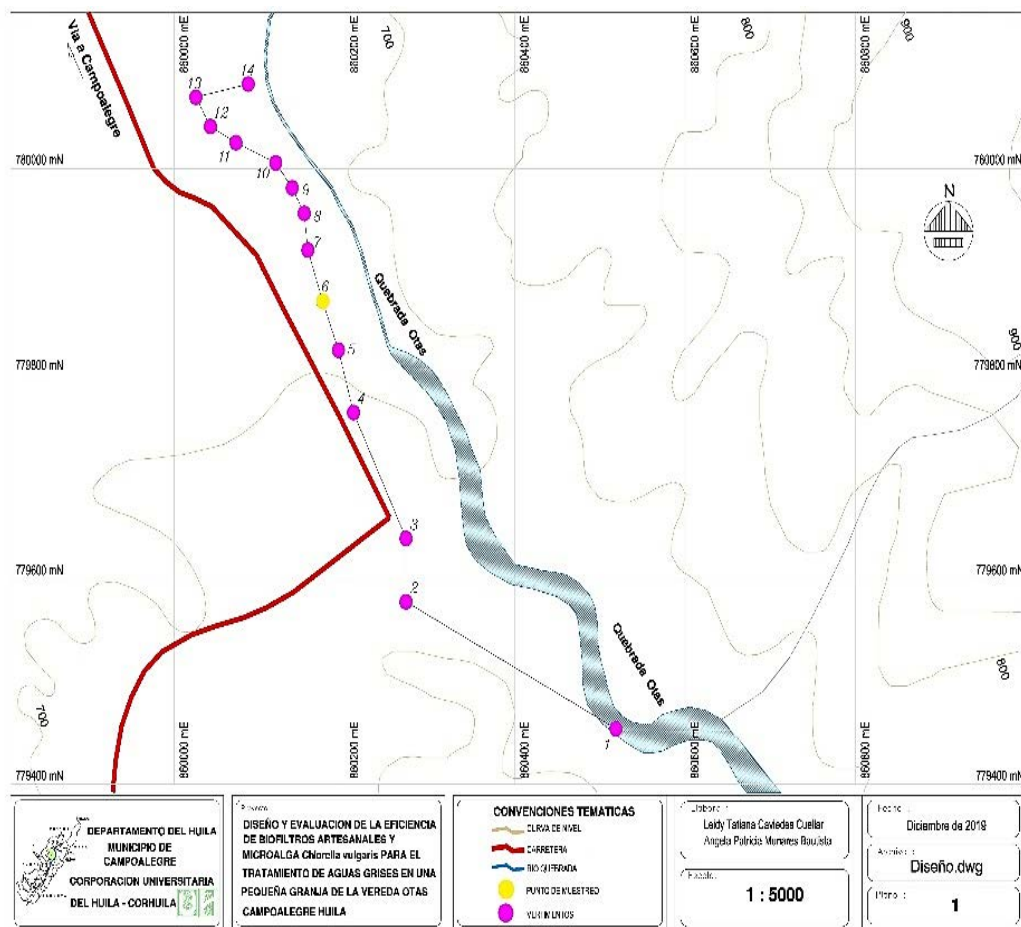


Figura 1. Puntos de vertimientos en la quebrada Otás, Campoalegre, Colombia

2.1 Recolección y obtención de las muestras

En la pequeña granja las aguas grises provenían del lavaplatos, lavamanos, lavadora, ducha y lavadero, siendo colectadas en un primer tanque reciclado; de allí se tomó la muestra testigo. Las muestras del día 6, 14 y 22 corresponden al periodo de funcionamiento del sistema se tomaron en el tanque de agua tratada mezclada con microalgas, dichos días de muestreos se seleccionaron de manera aleatoria. Los datos registrados en las muestras se manipularon en una hoja de campo, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Hoja de campo

Muestras	Fecha funcionamiento	Fecha de muestreo	Hora del muestreo	Tiempo de retención (TRH)	Actividades de la granja	Responsables del muestreo
Testigo						
Día 6						
Día 14						
Día 22						

El procedimiento consistió en tener una muestra inicial o testigo de la composición físicas y químicas del agua gris antes de iniciar el tratamiento, luego se determinó realizar tres (3) muestreos al finalizar el proceso correspondiente al tiempo de retención hidráulica, en tres (3) momentos o periodos aleatorios, día 6, día 14 y día 22. El laboratorio AGUALIMSU S.A.S., ubicado en la ciudad de Neiva, realizó los análisis de calidad del agua de las muestras de acuerdo con los parámetros establecidos por la Resolución 0631 de 2015, capítulo V, artículo 8; los resultados de los análisis comprueban la eficiencia del sistema de tratamiento en cumplir con los límites permisibles de vertimiento.

Con respecto a la cepa de *Chlorella vulgaris*, fue suministrada por el laboratorio de Limnología de la Corporación Universitaria del Huila – CORHUILA, incluso, allí se realizó el conteo de individuos usando un microscopio Advance Optical AC85-240V 50-60 Hz y una cámara de Neubauer, se obtuvo la población existente antes de ser inoculadas y luego de cada muestreo del tratamiento. En la cámara Neubauer el conteo se realiza observando en el recuadro del centro que está dividido en 25 cuadros pequeños, y se tiene en cuenta las microalgas de 5 cuadros que estén en las esquinas y del centro, luego se aplica la ecuación (1) para finalmente obtener la concentración [9].

$$\text{Concentración células } \left(\frac{\text{cel}}{\text{ml}}\right) = \frac{\Sigma \text{Total células contadas}}{\text{Número de cuadrados} \times \text{dilución}} \times 10000 \quad (1)$$

2.2 Diseño de los biofiltros artesanales

Los dos (2) biofiltros artesanales contienen cuatro (4) capas de los materiales así; el primer biofiltro denominado (1B) contiene una capa de arena fina equivalente al 10% del volumen del tanque; cascarilla de arroz con un 30%, siendo un material que presenta una buena capacidad de retención y purificación de agua [10]; tamo de arroz con un 40%, agrupadas en tiras de aproximadamente 20 a 40 cm y grava con un 20%, material aportante en aumentar la eficiencia en cuanto a la disminución de sólidos sedimentables [11]. El segundo biofiltro denominado (2B) contiene una capa de arena fina equivalente al 10% del volumen del tanque, cascarilla de arroz con un 30%, bagazo de la caña con un 40%, agrupadas en fibras de aproximadamente 100 a 150 cm, este presenta buen rendimiento en la remoción de contaminantes y finalmente grava con un 20%. Los tanques cilíndricos reciclados con capacidad de 500 L dispuestos para la construcción de cada biofiltro tienen medidas de alto 94.30 cm y ancho 94.10 cm como se muestra en la Figura 2, teniendo disponible para el llenado con los materiales filtrantes 92 cm (REF. E).



Figura 2. Dimensiones de los tanques reciclados

Los materiales en cada biofiltro artesanal se instalaron de manera que el agua a tratar tuviera el primero contacto con los materiales finos y de amplia filtración y finalizará con grava al fondo del tanque. En el caso del bagazo de caña y el tamo de arroz se realizó un proceso de secado a temperatura ambiente y luego fueron usados en los respectivos biofiltros. Por otra parte, los materiales filtrantes utilizados fueron de uso permanente hasta que llegaran a un posible estado de deterioro observado en el día 22, estos fueron dispuestos en un lecho de secado para su deshidratación y dispuestos en un área de bioseguridad.

2.3 Eficiencia del sistema de tratamiento de las aguas grises

La medición caudal promedio del agua residual generada en la granja es 0.2 L/s, se determinó por método volumétrico, en un tiempo de 12 horas diurnas, en condiciones de temperatura ambiente promedio de 28°C. La medición inició el sábado, el momento de mayor actividad de limpieza y lavado en la vivienda.

La tubería instalada en el sistema de tratamiento es de $\varnothing 60\text{mm}$, se conecta inicialmente a un tanque recolector para el almacenamiento del agua a tratar, a fin de reducir el flujo y saturación en los procesos de filtración (1B y 2B). Luego se retiene el agua en un tanque para agregar la especie *Chlorella vulgaris*, para aumentar la biodigestión de nutrientes (NPK) [12]. La inoculación se estableció que por cada 100 L de agua trata se mezclará con 1 L de *Chlorella vulgaris*, en un tiempo de retención hidráulica entre 20 a 24 horas (h) de llenado del tanque. Se resalta que la inoculación se realizó cada final del periodo de retención.

Las muestras se recolectaron según las especificaciones dadas por el laboratorio AGUALIMSU S.A.S., consistió en tomar las muestras usando envases plásticos y de vidrio según el parámetro analizar, con capacidad de un 1 L y rotulados, luego se empacaron en un termo de ICOPOR para transportarlo hacia el laboratorio localizado en la ciudad de Neiva. El tiempo recorrido entre la zona de estudio y el laboratorio es de aproximadamente 30 minutos. Los parámetros que se evaluaron del agua residual domestica son los establecidos en la Resolución 0631 de 2015, que se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos

Parámetros	Unidades	Límites máximos permisibles
Fosfatos	mg/l	-
Nitratos	mg/l	-
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l O ₂	200.00
Grasas y aceites	mg/l	20.00
pH	Unidades de pH	6.00 a 9.00
Nitrógeno Total	mg/l	-
Sólidos sedimentables	mg/l	5.00
Sólidos Suspendidos totales	mg/l	100.00

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Obtención de las muestras

Los registros para análisis de las muestras por parte del laboratorio fueron la testigo, el día 6, día 14 y día 22, algunas tomadas en diferentes horas de acuerdo con el llenado del tanque que contenía microalgas. A continuación, en la Tabla 3 se encuentran los datos durante los días de funcionamiento del sistema.

Tabla 3. Datos de los muestreos

Muestras	Fecha de funcionamiento	Fecha de muestreo	Hora del muestreo	Tiempo de retención (TRH)	Actividades de la granja	Responsables del muestreo
Testigo	No aplica	14/06/2019	10:00 a.m.	No aplica	Lavaplatos, lavamanos, lavadero, ducha, lavadora	Tatiana Caviedes Angela Munares
Día 6	19/06/2019	19/06/2019	2:50 p.m.	24 horas	Lavaplatos, lavamanos, lavadero, ducha, lavadora	Tatiana Caviedes Angela Munares
Día 14	27/06/2019	27/06/2019	8:00 a.m.	22 horas	Lavaplatos, lavamanos, lavadero, ducha, lavadora	Tatiana Caviedes Angela Munares
Día 22	04/07/2019	5/07/2019	9:00 a.m.	20 horas	Lavaplatos, lavamanos, lavadero, ducha, lavadora	Tatiana Caviedes Angela Munares

En el caso de los datos obtenidos en la concentración de células de *Chlorella vulgaris* se realizaron los respectivos conteos antes de la inoculación y durante la mezcla con el agua tratada, es decir, al finalizar el proceso de filtración por los biofiltros artesanales; se observó cambios en la concentración de microalgas como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos obtenidos de los conteos

Muestras	Cantidad (l) <i>Chlorella vulgaris</i>	Concentración celular (cel/ml) antes de inoculado en el biofiltro	Concentración celular (cel/ml) después de inoculado en el biofiltro
Día 6	5	8.39x10 ⁶	8.19x10 ⁶
Día 14	5	7.94x10 ⁶	7.80x 10 ⁶
Día 22	5	6.2X10 ⁶	6.65 X10 ⁶

3.2 Eficiencia del sistema de tratamiento con biofiltros artesanales y *Chlorella vulgaris*

El esquema del sistema de tratamiento llevado a cabo en la pequeña granja de la vereda Otás, como se muestra en la Figura 3. Los puntos de desagüe de aguas grises se unificaron a una tubería de $\varnothing 60\text{mm}$, conexión que acoplo a un primer tanque de almacenamiento, con el propósito de retener y evitar saturación en el proceso de filtración por los biofiltros. Cabe anotar que se realizó una prueba piloto del comportamiento de filtración por el 1B con porcentajes de grava 20%, tamo de arroz 30%, cascarilla de arroz 30% y arena fina 20% y el 2B con materiales de grava 20%, bagazo de caña 30%, cascarilla de arroz 30% y arena fina 20%, evidenciando que en 1B y 2B la capa de material de arena fina aumentaba el tiempo de retención del flujo de agua a tratar, generando rebose y consecutivamente bajo proceso de filtración; situación que se analizó y se determinó la modificación del porcentaje de arena fina a 10% en cada biofiltro.

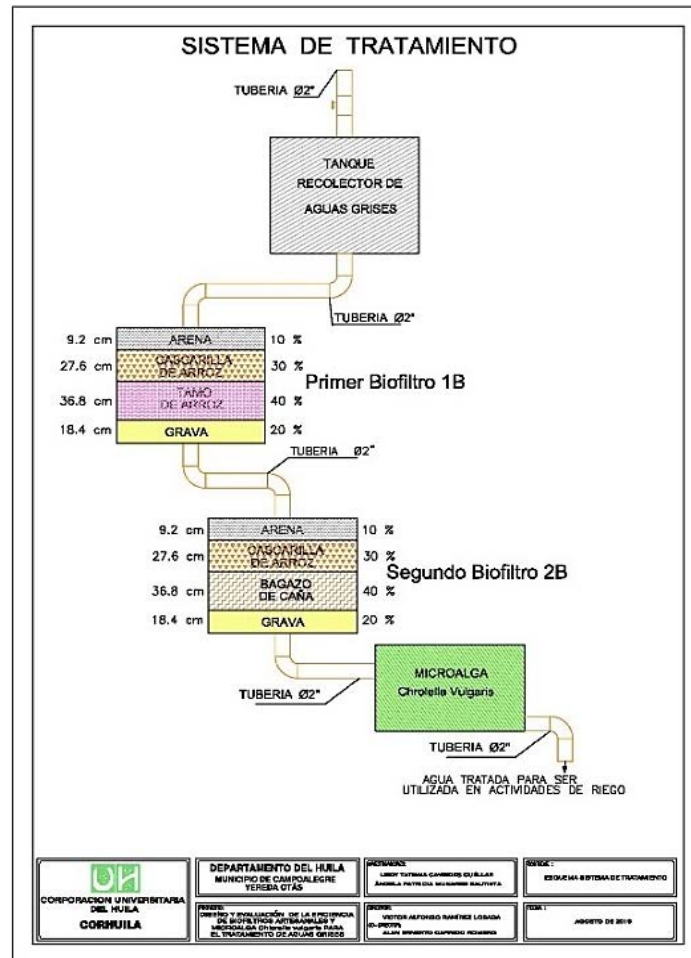


Figura 3. Esquema sistema de tratamiento con biofiltros artesanales y *Chlorella vulgaris*

De acuerdo con las modificaciones, el 1B se construyó por capas siendo depositada en la base del tanque el material de grava completando una altura aproximada de 18.4 cm (20%); encima, se agregó el material de tamo de arroz en tiras de entre 20 cm a 40 cm, llenado a una altura aproximada de 36.8 cm (40%); seguidamente la cascarilla de arroz con altura de 27.6 cm y en la última capa la arena fina con 9.2 cm de alto; valores que corresponden al 100% de los materiales utilizados y el equivalente en porcentaje de cada material según la capacidad del tanque de 92 cm.

El 2B se elaboró con un 20% de grava; bagazo de caña con 40%; cascarilla de arroz con 30% y arena fina con 10%; valores que corresponden al 100%. Luego de que el agua finalizará el proceso de filtración, se deposita el agua tratada en un último tanque que contiene 5 L de *Chlorella vulgaris* (cada 100 L de agua trata se mezcla un 1 L). El agua tratada mezclada con microalgas era retenía hasta completar llenado del tanque cuyo tiempo fue de entre 20 a 24 horas y finalmente se vertía directamente a los cultivos de pan coger de la pequeña granja. Cabe resaltar que después de presentar vaciado el tanque se adicionaba nuevamente la cantidad de microalgas.

Los datos dados por el laboratorio como se muestra en la Tabla 5, confirman la eficiencia del sistema de tratamiento con los biofiltros artesanales y el uso de *Chlorella vulgaris*, de acuerdo con los valores iniciales (testigo) de las aguas grises en los parámetros fisicoquímicos y su comportamiento en el transcurso de los 22 días de funcionamiento, demostrando remoción de la carga contaminante según los límites máximos permisibles de vertimiento de aguas domesticas establecidos en la Resolución 0631 del 2015.

Tabla 5. Resultados de los parámetros fisicoquímicos por el laboratorio AGUALIMSU S.A.S

Parámetros	Límites máximos permisibles	Día de muestreo			
		Testigo	6	14	22
Fosfatos (mg/l)	-	87	35.6	57.5	9.5
Nitratos (mg/l)	-	0.02	2.7	6.4	5.4
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	-	1.55	2.33	1.55	1.55
DQO (mg/L O ₂)	200.00	999.80	320.04	575.80	↓ 101.76
Grasas y Aceites	20.00	83341.0	17.0	13.0	↓ 13.0
pH	6.00 a 9.00	10.30	5.90	6.27	6.57
Nitrógeno Total (mg/l)	-	5.0	5.32	1.90	2.63
Sólidos Sedimentables (mg/l)	5.00	38.0	0.10	0.10	↓ 0.10
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	100.00	534	25	111	↓ 25

El sistema de tratamiento presenta remoción de DQO 89.82%, grasas y aceites 99.98%, pH 6.57 es aceptable, sólidos sedimentables 99.74% y sólidos suspendidos totales 95.32%. Sin embargo, en la normatividad vigente existen parámetros que no tienen definidos los valores de límites máximos permisibles, los casos fueron fosfatos 89.08%, nitrógeno total 47.4%, se tiene un aumento significativo de nitratos 5.4 mg/l y el nitrógeno amoniacal se mantiene en 1.55 mg/l, teniendo de referencia los valores de la muestra testigo de la calidad del agua gris de la pequeña granja.

La remoción de DQO probablemente se debió al metabolismo de los microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios que convirtieron los compuestos orgánicos del agua para su producción de biomasa [13]. Así mismo, se redujo probablemente porque existió una formación de biopelícula en el sustrato, cumpliendo con la fase de oxidación de la materia durante el tratamiento que se adhiere en la superficie porosa del lecho o material filtrante y así los microorganismos se sitúan allí, ayudando a transformar los compuestos orgánicos presentes en las aguas grises [13].

Es de resaltar que, en [7] y [14] el promedio de remoción de DQO en filtros percoladores oscila entre el 40 y el 70%, con base a esto, se puede discutir que los valores de remoción obtenida por el sistema de tratamiento realizado están por encima del rango establecido por dichas investigaciones, lo que se demuestra una eficiencia significativa en el sistema de tratamiento desarrollado en la pequeña granja.

Por otra parte, en el parámetro de grasas y aceites sus valores son significativos (13.0 mg/l; 99.98%), siendo el límite permisible más bajo entre los otros parámetros analizados según lo establecido en la Resolución 0631 de 2015. Tal efecto significativo, se obtuvo en la investigación para el tratamiento de aguas contaminadas, con remoción del 99.40% utilizando biofiltros experimentales, uno construido con materiales de aserrín y viruta; y otro con fibras de coco [15, 16].

De acuerdo con los datos registrados del agua gris de la pequeña granja antes de iniciar el proceso de filtración por el sistema de tratamiento el pH estaba en el rango de alcalino (10.30); al entrar en funcionamiento el sistema se observa con comportamiento significativo pasando a un rango de ligeramente ácido y finalmente los valores se acercan a la neutralidad (6.57); en [17] la investigación fue similar puesto que utilizaron materiales de arena fina y grava para la reducción de carga contaminante en aguas grises.

Además, en [18] los resultados fueron similares en un sistema de tratamiento desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, en el proceso incluyeron equipos tecnológicos cuyos valores de pH se mantenían en el rango del límite permisible por la normatividad vigente; es de resaltar que, el control del pH en el tratamiento de aguas contaminados es importante porque se aprovecha la presencia de organismos para la digestión de compuestos y lograr eficiencia en el tratamiento sin la adición de sustancias químicas.

En el caso del parámetro de sólidos sedimentables, la reducción de los valores es significativa y constante a partir del día 6 hasta el día 22 de los muestreos con 0.10 mg/l (99.74%), con respecto a su valor inicial de 38.0 mg/l, siendo este similar a los obtenidos por investigaciones desarrolladas en [19, 20] que, utilizaron materiales filtrantes de arena fina, grava gruesa, gravilla para eliminar sólidos sedimentables que contienen las aguas grises, además de servir de base para el desarrollo de las plantas acuáticas en el momento de implementar; asimismo, la instalación de un pretratamiento beneficia en la retener de la mayor parte de los sólidos sedimentables generados por las viviendas (aguas grises) y así tener un porcentaje de eficiencia del 99.9% de remoción, no obstante, el sistema de tratamiento llevado a cabo en la pequeña granja de la vereda Otás alcanza valores cercanos al mencionado, sin haber establecido un pretratamiento.

Los resultados de los valores en la muestra testigo para la concentración de sólidos suspendidos totales es 534 mg/l, posiblemente la carga contaminante en las aguas grises es proveniente del área de lavandería y cocina de la pequeña granja, lo que provoca el aumento de materia orgánica producto del lavado de frutas, verduras y ropa sucia impregnada de arena y arcilla por las actividades campesinas que desarrollan las personas de la zona, convirtiéndose en partículas que alteran la calidad del agua [21, 22]. En otras investigaciones, la efectividad en la remoción sólidos suspendidos totales del 99.9%, se logró por la implementación en el sistema de tratamiento de aguas grises varias unidades de pretratamiento por filtrar partículas gruesas, finas y graso [23].

En el caso de utilizar material de bagazo de la caña en procesos de filtración los resultados son significativos en la remoción de los sólidos suspendidos totales [24], así como ocurrió en la presente investigación desarrollada en la pequeña granja. Por el contrario, en [25] sucedió que implementaron en el sistema para tratar aguas grises un filtro artesanal con materiales el bagazo de caña y maíz, aserrín, cenizas de carbón vegetal y grava, obteniendo en los sólidos suspendidos totales valores de 220 mg/l, superando el valor máximo permisible que establece la normatividad vigente de 100.00 mg/l.

En un estudio realizado mencionan que, el promedio de remoción de fosfatos por filtros percoladores mediante lechos filtrantes oscila entre el 30% y 45% [1], datos que están por debajo a lo obtenido en la presente investigación que alcanzó valores significativos en la remoción de 89.08% para el tratamiento de aguas grises; adicionalmente, en los materiales orgánicos filtrantes de 1B y 2B del estudio, se observó la formación de biopelículas, favoreciendo la capacidad de absorber y acumular dicho compuesto, por parte de los microorganismos que lo consumen para su crecimiento y desarrollo metabólico [26]. Por lo tanto, se puede establecer que a medida que transcurrió el funcionamiento del sistema, se fue presentando un tratamiento biológico por el crecimiento de los microorganismos, debido a las condiciones estables en O₂ y temperatura que generan procesos de oxidación, liberando productos inorgánicos y CO₂; beneficio que permitió la disminución significativa de fosfatos [27].

En el parámetro de nitrógeno total, se presentó una reducción a 2.63 mg/l; aunque el valor es poco significativo se deduce que hubo la presencia de bacterias nitrificantes en la formación de la biopelícula, favoreciendo la oxidación del N₂ y al mismo instante siendo alimento por el desarrollo microbiano. Lo anterior, en [7] el estudio de investigación obtuvo cifras de reducción de entre 1.5 a 3.0 mg/l, datos que oscilan dentro de los obtenidos en la investigación realizada en la pequeña granja.

Los valores en el parámetro de nitratos tuvieron variaciones en los 3 muestreos durante el funcionamiento del sistema, presentando un aumento con respecto a la muestra testigo; según en [28, 29, 30] esto, es producto de la digestión en aumento por fertilizantes nitrogenados, debido a la carga contaminante proveniente de actividades humanas o animales que contienen compuestos nitrogenados. No obstante, los efectos negativos en la salud tanto de un ambiente natural o antrópico, en una población especialmente de niños que son los más vulnerables, la concentración presente en un cuerpo de agua que superó el rango de 150 mg/l es perjudicial [31, 32], dato que permite comparar con los resultados obtenidos en la investigación de la pequeña granja cuya cifra es poco significativa de 6,4 mg/l, presentándose en el día 14 de muestreo.

Con respecto al parámetro de nitrógeno amoniacal se evidenció un aumento en el día 6 de muestreo y en los días 14 y 22 de muestreo fue constante en comparación a la muestra testigo. En el proceso de remoción de amonio por filtración biológica es llamado nitrificación, donde presenta una oxidación sucesiva del

amonio a nitritos y finalmente a nitratos, proceso que se lleva a cabo en un ambiente aerobio mediado por bacterias autótrofas quimios sintetizadoras, estos organismos se fijan a medios filtrantes que forman una biopelícula [33]; incluso, el aumento en la primera muestra se debe a la presencia de material coloidal y biomasa remanente a la salida del tratamiento [7].

Finalmente, la especie *Chlorella vulgaris* aportó en el proceso de tratamiento de las aguas grises con la remoción de fosfatos y nitratos, compuestos que sirven de nutrientes para el crecimiento y desarrollo metabólico de la especie. Además, la especie genera biomasa útil en el suelo [34], momento que se presentó por el vertimiento del agua tratada a los cultivos de pan coger de la pequeña granja. Así mismo, el comportamiento de la microalga en presencia de fosfatos se asemeja a lo reportado en la investigación en [35], los valores de remoción de fosfatos alcanzados por la especie *Chlorella vulgaris* están en un porcentaje del 90%, demostrando ser eficaces en procesos de biorremediación.

Por lo tanto, este valor es similar a lo obtenido en la investigación de la pequeña granja con un porcentaje del 89.08%, es probable que la capacidad de absorción de compuestos orgánicos por parte de la microalga lo pueda realizar en ambientes con altas concentraciones de nutrientes; además, su metabolismo es muy activo, resistente a cambios ambientales y capaz de adaptarse y crecer en un agua residual con diferentes concentraciones de nutrientes, convirtiéndose en un recurso efectivo para mejorar considerablemente la calidad del agua [36].

Por lo anterior, se puede deducir que el cultivo de *Chlorella vulgaris* podría formar parte de una unidad de tratamiento alternativo dentro de un sistema de aguas residuales, incluso queda pendiente evaluar otros tiempos de retención (20 a 24 horas) del agua trata con la mezcla de las microalgas distintos a los aplicados en la investigación, con el fin de obtener mejores resultados en la remoción de compuestos orgánicos.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son satisfactorios debido a que se cumplió con los valores por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 como DQO, grasas y aceites, pH, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales para el vertimiento de aguas residuales domésticas.

Se requiere que, al emplear materiales de tamo de arroz y cascarilla de arroz se debe realizar un lavado intensivo porque posiblemente contienen residuos de fertilizantes nitrogenados o residuos adheridos que podrían alterar el tratamiento de aguas grises, esto permitirá que los biofiltros realicen su proceso de remoción en condiciones óptimas tal como se evidenció en las cifras de resultados de la muestra del día 22.

Los valores del sistema de tratamiento desarrollado mostraron valores diferentes en los 3 periodos de muestreos, en el día 6 de muestreo las cifras demuestran un comportamiento de tratamiento físico en el agua gris, es decir, los materiales inorgánicos fueron los que intervinieron en la reducción de la carga contaminante presente. No obstante, en los resultados del día 14 de muestreo se presencié un tratamiento combinado (tratamiento físico y biológico) debido a las capas del material orgánico y microorganismos (biopelículas), asimismo, en el último muestreo (día 22) los valores de los parámetros indicaron la eficiencia del sistema de tratamiento por los biofiltros y la especie *Chlorella vulgaris* en la remoción de carga contaminante de aguas grises.

Se comprobó que es necesario la instalación de un pretratamiento a fin de no saturar los materiales filtrantes en el primer biofiltro (1B), allí se evidencio una capa de grasas y espumas que tuvo que ser removida para evitar colmatación en el proceso. Situación que altero la filtración del agua en la primera capa (arena fina) del 1B y a su vez el aumento del tiempo de retención hidráulica. Sin embargo, los valores significativos en la remoción de grasa y aceites y DQO hacen viable la implementación del sistema de tratamiento para aguas grises en una pequeña granja.

La especie *Chlorella vulgaris* experimento tiempos de retención con el agua gris tratada de entre 20 a 24 horas, probablemente permitió que los valores en los resultados de reducción de los parámetros nitratos y fosfatos tuvieran una remoción significativa, adicionalmente, el agua tratada con mezcla de microalgas

servió de aportante de biomasa al suelo debido a que fue vertida directamente en cultivos de pan coger de la pequeña granja.

Se recomienda realizar investigación sobre la vida útil de los materiales orgánicos (tamo de arroz, cascarilla de arroz y bagazo de caña) en los biofiltros que se utilizaron para el funcionamiento el sistema de tratamiento, y si estos, aportan compuestos orgánicos o la producción de microorganismos (biopelículas). Al igual, disponer adecuadamente los materiales orgánicos en procesos de lecho de secado u otro proceso técnico luego de que finalice su vida útil, asimismo conocer el momento adecuado de realizar recambio de los materiales orgánicos o filtrantes.

REFERENCIAS

- [1] J. Silva, P. Torres, y C. Madera, "Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura," *Agronomía Colombiana*, vol. 26, no. 2, pp. 347–359, 2008.
- [2] A. Roa, y R. Cañizares, "Biorremediación de aguas con fosfatos y nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado," *Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 10, no. 1, pp. 71–79, 2012.
- [3] E. Niño, y N. Martínez, "Estudio de las aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicos de la ciudad de Bogotá," *Trabajo de grado*, Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [4] J. Suárez. *et al.* "El reciclaje de aguas grises como complemento a las estrategias de gestión sostenible del agua en el medio rural," ResearchGate, pp. 265–284, 2012.
- [5] K. Pérez. *et al.* "Uso de *Scenedesmus* para la remoción de metales pesados y nutrientes de aguas residuales de la industria textil," *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, no. 20, pp. 97–105, 2016.
- [6] M. Garzón, G. Buelna, y G. Moeller, "La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias," *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 3, no. 3, pp. 153–161, 2012.
- [7] R. Pacheco, "Biopercolación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales tipo domésticas," Trabajo de grado, Universidad de las Américas, 2015.
- [8] Alcaldía de Campoalegre, "Mi municipio", 2016. Recuperado: <http://www.campoalegre-huila.gov.co/Paginas/default.aspx>.
- [9] O. Bastidas, "Conteo Celular con Hematocitómetro," *Technical Note-Neubauer Chamber Cell Counting*, pp. 1–6, 2011.
- [10] E. Ortiz, y D. Chérrez, "Análisis de la cascarilla de arroz utilizada como material para filtros de tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans, Multiprocesos Gallegos," Trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, 2018.
- [11] D. Sánchez, "Attachment factor determination in upflow gravel filter in layers," *Ingeniería y competitividad*, vol. 19, no. 2, pp. 127–136, 2017.
- [12] A. Rosales, C. Rodríguez, y M. Ballen, "Remoción de contaminantes y crecimiento del alga *Scenedesmus sp* en aguas residuales de curtiembres, comparación entre células libres e inmovilizadas," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 14, no. 28, pp. 11–34, 2018.
- [13] M. Romero. *et al.* "Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 25, no. 3, pp. 157–167, 2009.
- [14] L. Rodríguez, "El tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas como alternativa sostenible para el saneamiento periurbano en Cuba," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 30, no. 1, pp. 29–35, 2009.
- [15] C. A. Bravo, C. J. Osorno, y E. Salgado, "Propuesta de un tratamiento para aceites y grasas de las aguas residuales de la microempresa "Productos Verdes" Laboratorio De Biotecnología, Unan –Managua," *Trabajo de grado*, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2016.
- [16] J. Vicente, "Determination of the efficiency of sawdust and coco fiber used as Biofilter for pollutant removal for the treatment of wastewater," *Enfoque UTE*, vol. 7, no. 3, pp. 41–46, 2016.
- [17] S. Cantillo, y W. Corpus, "Diseño e implementación de un filtro para tratamiento de aguas grises en la aplicación de un sistema de riego para una huerta casera en San Andrés Islas, Colombia," *Revista Loginn*, vol. 2, no. 1, pp. 2590–7441, 2018.
- [18] N. G. Ardila, "Viabilidad Técnica y económica del aprovechamiento de aguas grises domésticas," Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [19] E. Rengifo, y C. Rodríguez, "Evaluación de un Sistema de Biojardinera como alternativa de tratamiento de aguas jabonosas Proveniente de la finca las Parcelas," *Trabajo de grado*, Universidad Nacional abierta y a distancia, 2018.
- [20] N. Muñoz, "Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises por medio de biojardinera aplicado a viviendas rurales del departamento de Quiché," Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015.

- [21] G. Nagua, "Recuperación de aguas residuales grises mediante biofiltros," *Trabajo de grado*, Universidad Técnica de Cotopaxi, 2016.
- [22] L. Maldonado, y D. Guaman, "Análisis del aserrín como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de autos monster wash ubicada en el Cantón Ambato," *Trabajo de grado*, Universidad de Técnica de Ambato, 2018.
- [23] S. Moncada, "Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José," *Trabajo de grado*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [24] J. Guevara, y M. Curipallo, "Análisis del bagazo de caña como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal municipal de la ciudad de Puyo, provincia de Pastaza," *Trabajo de grado*, Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [25] F. Morales, y M. Jiménez, "Evaluación de un filtro artesanal del efluente de una lavadora de autos a base de bagazo de caña de maíz, aserrín, ceniza de carbón vegetal y grava," *Trabajo de grado*, Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [26] A. Jaramillo, y J. Paredes, "Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía - Morales," *Trabajo de grado*, Universidad Peruana unión, 2019.
- [27] R. Yucra, "Influencia del PET reciclado en las características del agua residual doméstica mediante el proceso de filtro percolador para el distrito de Taraco, provincia de Huancane, región Puno," *Trabajo de grado*, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2016.
- [28] R. Pérez, y J. Pacheco, "Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán," *Ingeniería*, vol. 8, no. 1, pp. 33-42, 2004.
- [29] M. Fernández, y Y. M. Vázquez, "Origen de los nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas," *Revista Minería y Geología*, vol. 22, no. 3, pp. 1-19, 2006.
- [30] L. Larios, "Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria: Significación sanitaria," *Revista Archivo Médico de Camagüey*, vol. 13, no. 2, 2009.
- [31] I. Galaviz. *et al.* "Agricultural Contamination of Subterranean Water with Nitrates and Nitrites: An Environmental and Public Health Problem," *Journal of Agricultural Science*, vol. 2, no. 2, pp. 17-30, 2010.
- [32] L. Larios. *et al.* "Metahemoglobinemia en un lactante por consumo de agua con alto contenido de nitratos en Camagüey," *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, vol. 53, no. 3, 2016.
- [33] I. Gallego, y D. García, "Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: Percolador-columna de arena," *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 8, no. 1, pp. 81-93, 2017.
- [34] A. Mehrabadi, R. Craggs, y M. Farid, "Wastewater treatment high rate algal ponds (WWT HRAP) for low-cost biofuel production," *Bioresource Technology*, vol. 184, pp. 202-214, 2015.
- [35] M. Ortiz, M. Romero, y L. Meza, "La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia," *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, vol. 9, no. 1, pp. 163-176, 2018.
- [36] J. Salgueiro, "Cultivo de microalgas en aguas residuales y aprovechamiento energético de la biomasa algal," *Tesis Doctoral*, Universidad de Vigo, 2018.

Evaluación y caracterización del contenido de microplásticos en el estiércol de ganado caprino

Clara Lizzette Puentes García¹

Deisy Lorena Ramos Chala²

Paula Martínez Silva³

Corporación Universitaria del Huila
Colombia

El ganado caprino es importante en las zonas del desierto de la Tatacoa y la vereda de Polonia en el municipio de Villavieja, Colombia, ya que este es una de las principales fuentes de ingreso económico para sus habitantes, debido a su capacidad de adaptación a las características de este ecosistema terrestre de importancia regional. Por ende, son un tipo de fauna domestica estratégica para implementarse como bioindicador para determinar la presencia, abundancia, forma, color y clasificación de los microplásticos, porque presentan propiedades de ecotoxicidad y biocomulación y, por su tamaño (5 mm a 0,001 mm), pueden entrar en contacto por vía digestiva al confundirlos con su dieta, biomagnificándose a través de los productos que generan como carne, leche y derivados. En esta investigación se estudió la presencia de Microplásticos MP en las heces del ganado caprino de tres zonas del desierto de la Tatacoa (Hoyos, Xilópalos y Cusco) y la zona de Polonia, hallándose que el 100% de las muestras analizadas en el laboratorio de Limnología de la Corporación Universitaria del Huila, contenían MP de origen secundario, en concentraciones \pm de 30 partículas por kilogramo de heces. La mayor concentración se evidenció en los lugares más turísticos y poblados, como Cusco 35,2% (647 MP) y Polonia 29,2% (536 MP). Dado el constante flujo de turistas en estas zonas se aumenta los residuos plásticos, a comparación de las zonas más alejadas y menos turísticas, que presentan menos contaminación por MP, como Xilópalos con 18,2% (334 MP) y Los Hoyos con 17,3% (316 MP). Viéndose necesario ejecutar acciones concretas para la adecuada gestión de residuos y la formulación de alternativas de productos y servicios sostenibles enfocados en la economía circular.

¹ Estudiante de Ingeniera Ambiental.
Contacto: c-puentesg@corhuila.edu.co

² Estudiante de Ingeniera Ambiental.
Contacto: d-ramosc@corhuila.edu.co

³ Profesora tiempo completo.
Contacto: Paula.martinez@corhuila.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El término de Contaminante Emergente CE generalmente se utiliza para referirse a compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente no se considera significativa en términos de distribución y/o concentración [1]; sin embargo, con base en estudios científicos llevados a cabo en diferentes ecosistemas, matrices o componentes ambientales, se han registrado los efectos adversos al medio ambiente y a la salud de las personas y animales. Por tal motivo es importante documentar e informar sobre la problemática que pueden ocasionar, específicamente los MP, los cuales hacen parte de estos CE, siendo partículas sólidas persistentes compuestas de polímeros sintéticos o semisintéticos, procedentes de fuentes antropogénicas que miden menos de 5 mm [2-5].

Existen dos principales categorías para su clasificación: de origen primario, que se fabrican intencionalmente de cierto tamaño con fines industriales o secundario, provenientes de la degradación de materiales más grandes, sea por su fragmentación en MP [2]. Las mayores fuentes de MP son el desgaste de los neumáticos y la degradación de plásticos de un solo uso, con cantidades estimadas de alrededor de 100.000 toneladas por año [6, 7]. Los MP están directamente relacionados con la producción de plástico, el cual se lleva a cabo mediante diferentes procesos industriales y la combinación de aditivos. Todo ello consigue aumentar la vida útil del plástico que, para 2018 en el mundo alcanzó casi los 360×10^6 de Ton [8].

El plástico MP es ahora el material reportado con más frecuencia entre residuos sólidos y fauna como peces, aves marinas, reptiles marinos (tortuga) y mamíferos (ballena, oso andino, coatí andino, pingüino, entre otros) [6, 9-11], incorporándose accidental o intencionalmente a sus organismos. Su composición y su gran superficie relativa los hacen propensos a que se les adhieran los contaminantes orgánicos y a la vez se libere mayor toxicidad, llevando de esta forma toxinas a la base de la cadena alimentaria [12], siendo los escenarios repetitivos en diferentes especies de animales en el planeta, confundiendo los MP con su alimento original provocando intoxicación, capaces de llegar incluso hasta los sistemas digestivos de estos, a través de diferentes mecanismos, vías respiratorias o ingesta, siendo este último el mecanismo de exposición crónica debido al consumo de alimentos, provocando además daño intestinal, necrosis celular, cambios en el metabolismo, alteración de reservas de grasas y energía o muerte [13] Por tal motivo se da a conocer la problemática ocasionada por este tipo de CE, en el ecosistema turístico del Bosque seco Tropical (Bs-T) Desierto de La Tatacoa y Polonia, brindando una línea base de investigación sobre MP en matrices biológicas (heces de caprino) ya que se ha estudiado muy poco en Colombia y no se evidencia ningún estudio a nivel local.

2. MÉTODO

2.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en Colombia al norte del departamento del Huila como se evidencia en la Figura 1, abarcando territorio del municipio de Villavieja. Cuenta con una superficie de 3×10^3 ha para un total de once (11) veredas (siendo Polonia una de estas), entre el río Magdalena y la cordillera Oriental; posee un rango altitudinal de 340-1250 msnm, con una precipitación de 1078 mm anual, con una zona de vida de Bosque seco Tropical Bs-T y Bosque muy seco Tropical Bms-T, que comprende un 55,2% del municipio de Villavieja y del Distrito Regional de Manejo Integrado DRMI del Desierto de la Tatacoa [14], [15], al ser estas zonas turísticas llegando en promedio de 250.000 visitantes por año, [16] la generación de residuos es mayor impactando negativamente el ecosistema.

2.2 Puntos de muestreo

Para evaluar la presencia de MP se eligieron los siguientes sitios por su importancia turística a nivel departamental, nacional e internacional: Cusco ($3^{\circ} 13' 50.65''$ N $75^{\circ} 10' 15.08''$ O) conocida como el sector ocre del desierto presentando geoformaciones de color rojizo, los Hoyos ($3^{\circ} 14' 19.14''$ N $75^{\circ} 6' 3.78''$ O) el sector gris, valle de los Xilópalos ($3^{\circ} 14' 14.35''$ N $75^{\circ} 6' 1.74''$ O) que debe su nombre a que en él se encuentra restos de madera petrificada y la vereda de Polonia Villavieja ($3^{\circ} 11' 14.4''$ N $75^{\circ} 13' 5.2''$ O), municipio considerado como un monumento histórico para la humanidad, debido a que es el municipio más antiguo

del departamento. Para la recolección de muestras representativas de MP se tuvo en cuenta una de las actividades más relevantes económicamente que es la ganadería caprina.

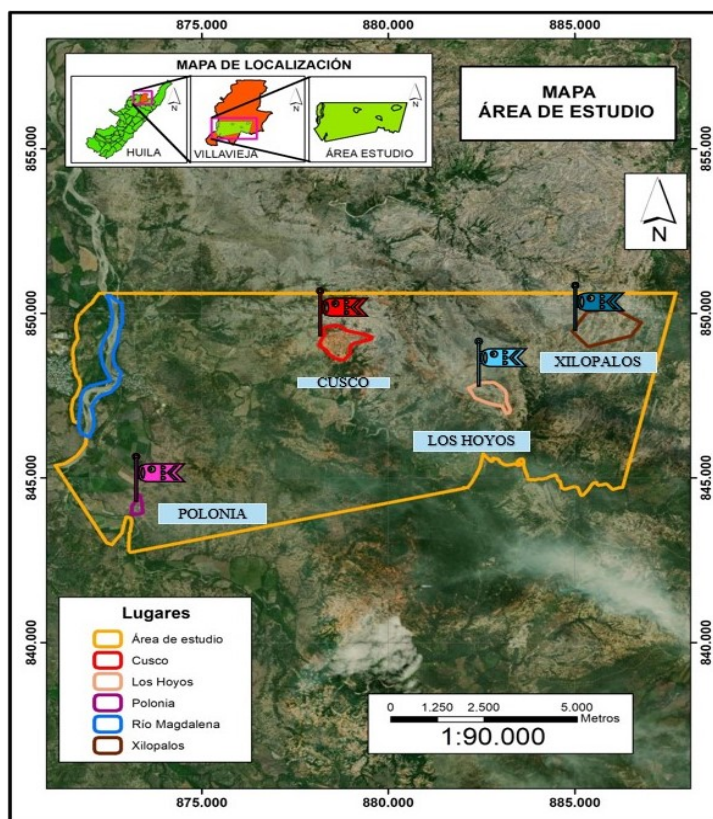


Figura 1. Localización de las áreas de estudio donde se recolectaron las muestras de heces adecuadamente

2.3 Recolección de muestras

Se realizó la recolección manual con guantes de nitrilo de 1 kg de muestra de materia fecal fresca por cada zona, siguiendo los parámetros establecidos en investigaciones científicas ya elaboradas [9-11, 17] en los predios identificados con presencia de este tipo de ganado, teniendo alrededor de 15 a 30 cabras por cada corral, finalmente se depositaron en papel aluminio y se almacenaron para su transporte en caja de cartón hacia las instalaciones del laboratorio de Limnología de la Universidad Corhuila, con el objetivo de no alterar los resultados, refrigerándose a (-4°C) con la finalidad de congelarlas en su totalidad, para su conservación y posterior análisis.

2.4 Análisis de laboratorio

La fase de laboratorio consta de dos etapas la primera de filtración de muestras y la segunda de cuantificación de MP por microscopia. Durante la primera etapa las muestras de heces se dividieron y pesaron, eligiendo tres muestras de 5 g por cada zona, adicionalmente la solución para su digestión constó de Peróxido de Hidrógeno H_2O_2 y agua destilada los cuales se filtraron, utilizando filtros de papel celulosa de 20 μm y bombas de vacío para evitar contaminación externa a las muestras. Colocándose en Erlenmeyer de 500 mL., 200 mL de disolución de H_2O_2 al 30% y 200 mL de agua destilada, posteriormente fueron tapadas con papel aluminio y dispuestas en la incubadora Memmert IF260 durante 3 días a 60 ° C, logrando la digestión del material orgánico. Pasados los tres días, las muestras se centrifugaron durante 15 minutos a 4000 rpm en la centrifugadora Universal Centrifuge modelo PLC - 012E.

Una vez las muestras fueron procesadas, se pasaron por dos filtros. Un primer filtro con un colador de tela, con el fin de retener materia orgánica y facilitar el segundo proceso de filtración en el cual se utilizaron filtros de celulosa con ojo de malla de 20 μm , finalmente se realizó el mismo procedimiento de filtración acompañados por la bomba de vacío, depositando los filtros con el residuo en cajas de Petri, rotuladas para su posterior análisis.

La segunda etapa se realizó por medio de un microscopio binocular biológico modelo CX – 21 Led, marca Olympus, en aumentos 10 X y 40 X, cuantificando y clasificando los MP en color y forma. Posteriormente se realizó un recuento de cada categoría para cada lugar muestreado y por cada muestra se obtuvo una tabla de datos (Tabla 1), que permitió realizar comparaciones estadísticas entre los cuatro lugares.

En cuanto a los colores de los MP, se tuvo en cuenta su proveniencia, cantidad y tonalidad (cálido - frío), clasificándolos según la metodología descrita en [4, 6, 18-20], de cada color de MP se llevaron nueve muestras al laboratorio Ensurcafe de la Universidad USCO con el fin de identificar el tipo de polímero por medio de la microscopía FT-IR modelo Agilent Cary 630 FT-IR Spectrometer.

2.5 Análisis de datos

El análisis estadístico que se aplicó para establecer o verificar si existen diferencias estadísticas entre la mediana de la abundancia de fragmentos o de fibras entre los lugares de muestreo fue la Prueba o Test de Kruskal-Wallis [21], método no paramétrico para probar si un grupo de datos proviene de la misma población, no asume normalidad en los datos, en oposición al tradicional ANOVA. Sí asume, bajo la hipótesis nula, que los datos vienen de la misma distribución [22]. La hipótesis nula establecida para la investigación fue: *no existen diferencias significativas entre las medianas del número de fragmentos y fibras*. Las dos pruebas se realizaron utilizando el software de distribución libre Past 4.02.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se detectaron un total de 1833 MP entre fragmentos (1736) y fibras (97) de las muestras analizadas en las heces de ganado caprino Tabla 1, coincidiendo en su mayoría tonalidades rojas, amarillas, negras, verdes y azules, entre otras.

Tabla 1. Tabulación general de los microplásticos encontrados en las muestras de laboratorio.

Puntos de muestreo	Fragmentos						Fibras						
	Rojo	Azul	Blanco	Ama	Negro	Trans	Verde	Rojo	Am	Azul	Trans	Negro	Verde
Los Hoyos 1	59	21	0	0	1	0	4	2	2	1	0	3	0
Los Hoyos 2	62	46	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	1
Los Hoyos 3	102	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	2	0
Sub total	223	69	0	0	1	0	8	4	2	1	1	6	1
Villa vieja 1	174	2	2	10	0	0	0	42	0	0	0	4	0
Villa vieja 2	189	44	3	0	0	2	0	0	0	1	0	3	1
Villa vieja 3	54	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	2	0
Sub total	417	46	5	10	1	2	2	42	0	1	0	9	1
Cusco 1	272	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Cusco 2	297	8	0	7	0	0	3	1	0	1	2	2	0
Cusco 3	30	6	0	0	0	0	0	2	0	6	0	2	0
Sub total	599	16	0	11	0	0	3	3	0	7	2	6	0
Xilópalos 1	119	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Xilópalos 2	24	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
Xilópalos 3	84	39	0	0	5	0	0	0	0	0	0	4	0
Sub total	227	91	0	0	5	0	0	0	0	0	0	11	0
Total	1466	222	5	21	7	2	13	49	2	9	3	32	2

Entre las cuatro zonas estudiadas se evidenció (Figura 2) que la zona de Cusco presenta mayor concentración de contaminantes MP con un porcentaje total de 35,2% (647 MP), seguida de Polonia - Villavieja con 29,2% (536 MP) posteriormente se encuentra Xilópalos con 18,2% (334 MP) y finalmente Los Hoyos con 17,3% (316 MP) siendo la de menor concentración.

La mayor concentración de fragmentos se estableció en la zona de Cusco (629), mientras que las fibras en la zona de Polonia Villavieja (53), no obstante, Polonia - Villavieja es el segundo lugar con mayor presencia de fragmentos (483) y Cusco el segundo lugar con mayor presencia de fibras (18). Los sitios más apartados

del Desierto de la Tatacoa presentan la menor concentración de MP tanto en fibras como en fragmentos, los Hoyos (301 fragmentos y fibras 15) y Xilópalos (128 fragmentos y 4 fibras), observado en la Figura 3.

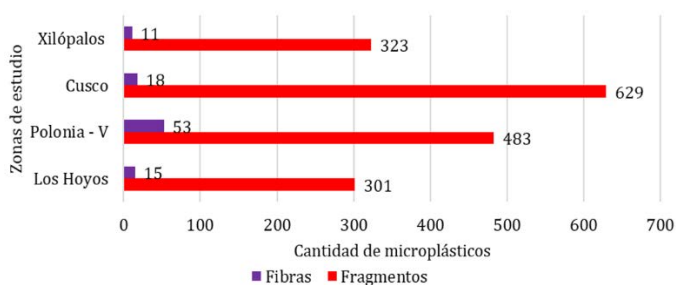


Figura 2. Cantidad de microplásticos encontrados por zona de estudio

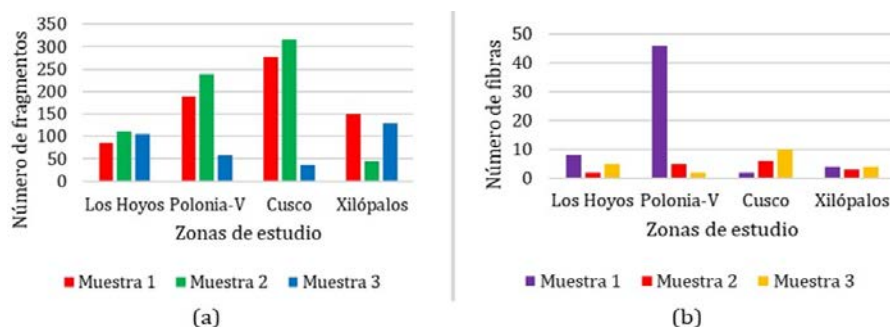


Figura 3. Cantidad de fragmentos (a) y fibras (b) por muestra en cada zona

La Tabla 2 establece la concentración calculada de este CE en las heces del ganado caprino en 500 ml de solución con 5 gr de heces por muestra, constatando el valor aproximado de MP en 1 kg de heces de caprino, siendo Cusco el área con la mayor abundancia de MP \approx 43 partículas/ kg, seguido Polonia - Villavieja (\approx 36 partículas/ kg), la zona de Xilópalos (\approx 22 partículas/ kg) y finalmente Los Hoyos (\approx 21 partículas/ kg).

Tabla 2. Resultado de microplásticos en la cantidad de muestra procesada

Muestra	Partículas en 500 ml de sln	Fibras	Fragmentos	Muestra procesada (gr)	Partículas/kg
Los Hoyos 1	93	8	85	5	21,066
Los Hoyos 2	114	2	112	5	
Los Hoyos 3	109	5	104	5	
<i>Total Hoyos</i>			<i>316</i>	<i>15</i>	
Polonia -V 1	234	46	188	5	35,733
Polonia -V 2	243	5	283	5	
Polonia -V 3	59	2	57	5	
<i>Total Polonia -V.</i>			<i>536</i>	<i>15</i>	
Cusco 1	280	2	278	5	43,133
Cusco 2	321	6	315	5	
Cusco 3	46	10	36	5	
<i>Total Cusco</i>			<i>647</i>	<i>15</i>	
Xilópalos 1	155	4	151	5	22,266
Xilópalos 2	47	3	44	5	
Xilópalos 3	132	4	128	5	
<i>Total Xilópalos</i>			<i>334</i>	<i>15</i>	

En la Figura 4 se evidencia los MP detectados en las muestras de heces observando partículas entre fragmentos y fibras detallados en microscopio binocular biológico (modelo CX-21 LED marca Olympus ®). entre los objetivos 10 X - 40 X.

Existe un importante grado de contaminación por MP en el DRMI la Tatacoa y en la vereda de Polonia del municipio de Villavieja evidenciándose fragmentos en su mayoría, indicando que gran parte de MP en las zonas de estudio son de origen secundario, provenientes de la degradación de materiales grandes por fragmentación [2]. Relacionado con la industria hotelera y turística de la zona, posicionándose en los últimos años como uno de los principales referentes de turismo de naturaleza en el departamento del Huila, dado sus escenarios naturales [23]. En consecuencia, estos establecimientos se encuentran cercanos a los

corrales del ganado caprino que debido a la falta de educación ambiental y de espacios propios para el desarrollo, alimentación y crecimiento de estos, se ven afectados por la contaminación generada de la inadecuada disposición de residuos plásticos.

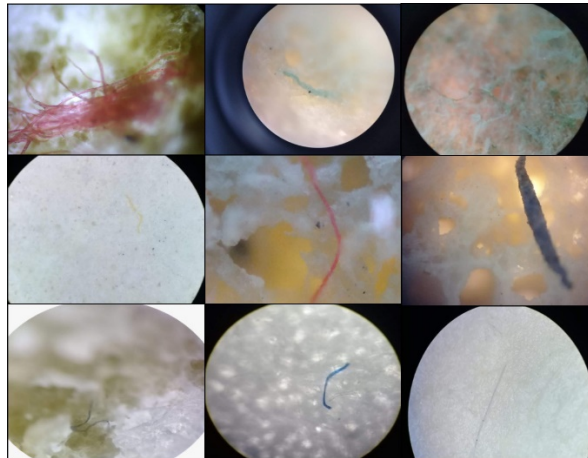


Figura 4. Microplásticos observados en microscopio con objetivos 10 X y 40 X

Con respecto a las tonalidades de los fragmentos analizados se constató la variedad de estos, prevaleciendo el color rojo, con un porcentaje del 84,4% (1466) en las cuatro zonas, Hoyos, Cusco, Xilópalos y Polonia – Villavieja (Figura 5); aunque fue el color con mayor presencia respecto a los otros colores, en todas las zonas se encuentra en distintas concentraciones, siendo Cusco la mayor con 599, seguida por Polonia - Villavieja con 417, Xilópalos con 227 fragmentos y finalmente 223 en Hoyos con la menor concentración, las demás tonalidad presentan menor concentración. Respecto a los colores de fibras, nuevamente el color rojo fue el de mayor presencia con un porcentaje del 50,5% (49 fibras) a diferencia de las otras tonalidades, la zona donde mayor concentración se evidencio fue la vereda de Polonia, siendo las otras tonalidades de menor abundancia.

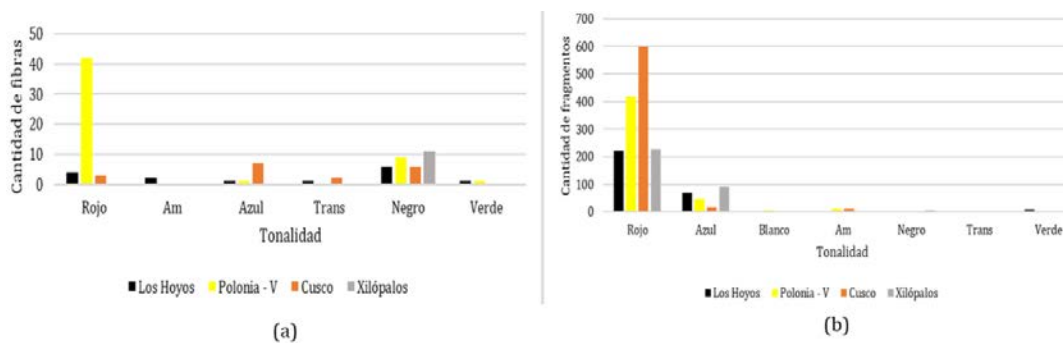


Figura 5. Clasificación de fragmentos (a) y fibras (b) por colores en cada zona

Basándose en la Rueda Munsell [24] como referente al momento de determinar el tipo de tonalidad evidenciado en las micropartículas, se agrupó los colores en cálidos (rojo, naranja, blanco, amarillo, café) o fríos (verde, azul, morado), demostró que los colores cálidos tienen el mayor porcentaje de presencia en las muestras con un 84,4% (1548) y los colores fríos tan solo obtuvieron el 15,5% (285) como se evidencia en la Figura 6. Lo anterior sugiere que en ecosistemas terrestres y con las características del suelo del Desierto de la Tatacoa y Polonia - Villavieja que en su mayoría son cálidas, tienden a predominar estas tonalidades, por lo cual se les relaciona directamente, a comparación de los ecosistemas acuáticos en donde predominan los colores fríos [25].

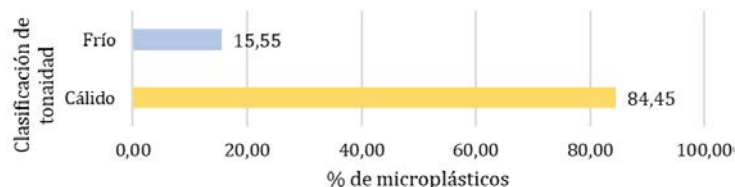


Figura 6. Porcentaje de participación de microplásticos según la clasificación de tonalidades cálidas y frías

La radiación solar e intemperie aceleran la degradación del plástico, en consecuencia, esta industria involucra aspectos más complejos al diseñar sus resinas y el color de estas, coordinando diversos factores (niveles de tolerancia, tipo de colorante, clase de pigmento (orgánico e inorgánico), aditivos, concentrados, dosificaciones, resistencia térmica, solides a la luz e intemperie o estabilizadores térmicos) los cuales absorben el calor protegiendo la matriz polimérica [26] a lo que juegan un papel importante en reducir la descomposición y degradación de estos, absorbiendo diferentes frecuencias de la luz solar [27], por lo tanto aunque la gama de color rojo presenta un índice de refracción del 20% y de absorción de calor del 80% [28] le permite presentar menor grado de degradación y persistir en un ecosistema de alta radiación solar como el estudiado (Promedio anual de 162.8 KWh / m²) [29] en comparación de otros MP de tonalidades claras. Adicionalmente el tipo de polímero identificado mediante FT-IR para la tonalidad roja es Polietileno de Baja Densidad LDPE el cual está relacionado con mayor estabilidad térmica [30], generando que su degradación sea menor y por ende presente mayor abundancia en las muestras recolectadas y analizadas. En cuanto a los colores naranja y café se definieron (PET) degradado por el alto potencial de fragmentación y degradación de los plásticos, al estar expuestos a la intemperie con mayor radiación solar, la cual aumentaría la generación de MP.

Investigaciones han documentado que, debido al inapropiado manejo de los residuos sólidos y el consumo excesivo de plásticos de un solo uso Figura 7, dando como resultado la gran distribución de los MP en el medio ambiente, causando variedad de efectos negativos. Los animales son expuestos a MP a través de la ingesta de este material contaminante. La mayoría han sido registrados para aves y fauna marina, como ballenas, delfines, tortugas y peces, en los que se ha encontrado restos de polímeros sintéticos, como envases, MP, cuerdas, entre otros [9], suponiendo riesgo medioambiental porque producen una contaminación invisible. Entre sus características principales se encuentra la amplia durabilidad y su acumulación en los ecosistemas, permitiendo que los MP puedan avanzar a través de la cadena trófica [31]. Pueden ingresar en dos vías principales: en el aire a través de los conductos nasales y la ingestión por la boca, esta última plantea problemas de salud debido a la translocación potencial de partículas del tracto digestivo a otros tejidos y como mecanismo de suministro de sustancias químicas tóxicas [32].

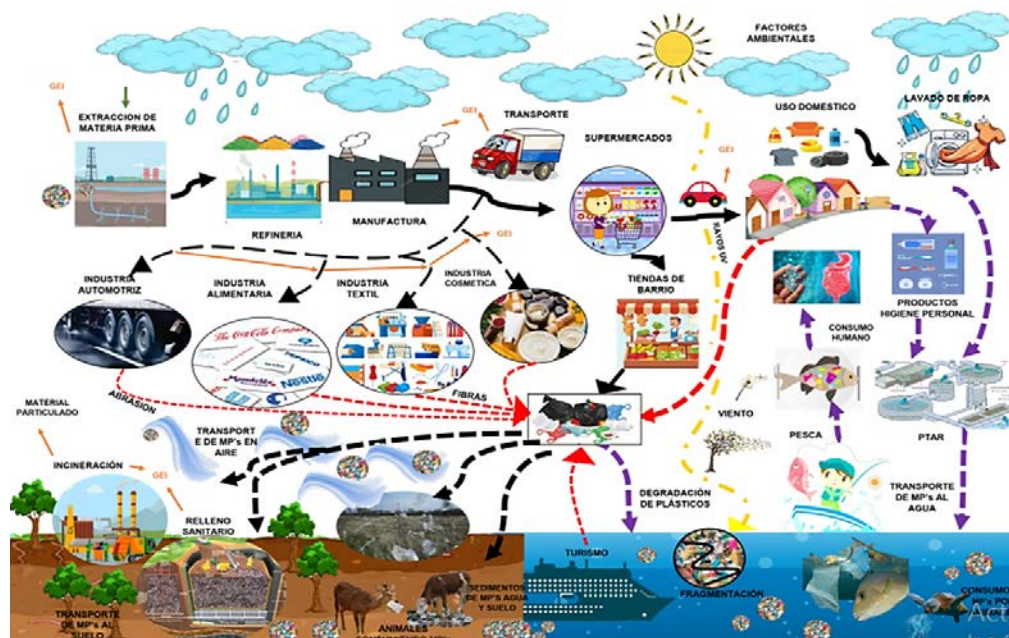


Figura 7. Fuentes y transporte de microplásticos al medio ambiente

Entre otras afectaciones se encuentra: reducción de la condición reproductiva, la capacidad de escape de depredadores, disminución del apetito (sensación de llenura), daños a la piel y ulceración de las capas internas de órganos, pudiendo penetrar en las células y migrar a tejidos y órganos, disnea (ahogo y dificultad para respirar debido a inflamación de las vías respiratorias), problemas respiratorios. daños físicos en organismos (obstrucción del sistema digestivo y respiratorio), afecciones cancerígenas, afecciones cardiovasculares, biomagnificación afectando a los organismos presentes en la cima de estos, trastornos en el metabolismo energético y cambios en el perfil de lípido, entre otros [33, 34].

Las microfibras encontradas corresponden principalmente a la zona residencial en Polonia con 53 fibras, relacionándose directamente con la generación de fibras, provenientes del desgaste de prendas textiles como el poliéster o el nylon, ocasionadas por sus habitantes, al momento de lavarlas, generando estos MP secundarios [35]. Adicionalmente la vereda de Polonia aunque cuenta con diseño e infraestructura de PTAR, no tiene la capacidad suficiente para recibir la totalidad de las aguas residuales o en épocas de invierno deja de operar, debido a daños en su sistema por aspectos climáticos [36] terminando los vertimientos en el cauce del río Magdalena, produciendo un foco de contaminación que en materia de fibras es bastante [37] Por tal motivo las cabras pueden no solo estar consumiendo MP en los forrajes de las zonas, sino que también en los sedimentos cercanos al río Magdalena o pueden estar presentes en el agua que beben dado a su cercanía con estos cuerpos hídricos.

Los análisis estadísticos mediante el método no paramétrico de Kruskal-Wallis corroboran la hipótesis nula planteada que indica *no existen diferencias significativas entre las medianas del número de fragmentos y fibras*, no obstante, señalan el potencial de las variables atípicas por cada zona, siendo significativas desde el punto de vista investigativo y práctico respecto a la problemática de MP evidenciada en el DRMI la Tatacoa y Polonia - Villavieja. Todas las zonas analizadas representan un patrón frente a la abundancia de tonalidades de color rojo respecto a los otros colores evidenciados, entre mayor reconocimiento y turismo en el área de estudio (Cusco y Polonia), mayor es esta tonalidad relacionándose con el consumo constante de diferentes productos que contienen este color por parte de turistas y locales, en su mayoría bolsas de basura, snacks y bebidas carbonatadas.

La ausencia de programas organizados y armoniosos con el gobierno local en cuestión de reducción, reutilización y aprovechamiento de residuos sólidos plásticos, junto a la deficiente red de tratamiento de aguas residuales en las zonas de estudio, aumentan el potencial de contaminación de MP como se evidencia en las heces del ganado doméstico caprino, aumentando el impacto ambiental no solo en el aumento y dispersión de MP sino en componentes ambientales, fauna y flora, paisajísticos, sociales y económicos.

4. CONCLUSIONES

Es clara la contaminación por MP en un ecosistema de suma importancia turística, ambiental, económica y social a nivel regional, como lo es el Desierto de la Tatacoa y Polonia en Villavieja, Colombia, siendo los lugares más turísticos y poblados los de mayor abundancia de este contaminante, debido a que en estos se encuentra gran cantidad de hostales, tiendas, restaurantes y otras actividades recreativas existiendo un constante flujo de turistas y personas en todas las épocas del año, lo que genera un alto consumo de plásticos de un solo uso, que son expuestos al consumo del ganado caprino, al no realizarse un control por parte de la población local, autoridades y turistas de los residuos que se generan y la falta de cultura sobre la debida disposición final del plástico.

En este tipo de ecosistema terrestre dichos plásticos tienden a degradarse rápidamente debido a las características climáticas y del suelo del área de estudio, en donde pueden facilitar el almacenamiento y transporte de este contaminante de forma poco visible al ser la mayoría de MP de tonalidades cálidas, demostrándose con base en el análisis de la Rueda Munsell. Por tal motivo, es importante que se establezcan, gestionen y ejecuten los aspectos definidos en el plan de manejo del DRMI la Tatacoa, generando una conciencia racional del impacto a la salud y al ecosistema vulnerable de la Tatacoa que presenta Zonas Críticas de Erosión ZCE según el acuerdo 20 del 99, otorgado por la CAM; siendo la Resolución 1558 de 2019, un modelo a seguir respecto a la contaminación por MP en esta ZCE y su potencial turístico, cuyo propósito es prohibir el ingreso y la utilización de plásticos de un solo uso en las áreas del Sistema Nacional de Parques Nacionales Naturales PNN con vocación turística, realizado por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Dirección General de PNN. Promoviendo una transición hacia la economía circular, mayores inversiones de las autoridades locales en recolección, acopio y aprovechamiento de residuos plásticos, incentivos al desarrollo de negocios verdes, generando oportunidades de mercado, ecodiseño e innovación, resaltando una cultura ciudadana para locales y turistas, teniendo en cuenta que los productos como el queso, la leche de cabra, las panelitas y la carne, pueden estar expuestos a contaminación por nanoplasticos si no se regula a tiempo.

Se recomienda realizar investigaciones de los impactos de MP en los sistemas de la macrofauna, las causas, consecuencias y posibles soluciones, recalcando su importancia debido a que es un tema que en la actualidad y tras el uso excesivo y constante del plástico, toma gran relevancia y genera grandes preocupaciones en el ámbito social, ambiental y de la salud. Adicionalmente, este tipo de ganado es una de las principales fuentes de ingreso económico para sus habitantes, por lo cual los MP representan una amenaza al tener características toxicológicas, ser bioacumulables y biomagnificables, debido a que se estima que los MP hallados representan aquellas partículas que fueron ingeridas y excretadas por las cabras, sin embargo, la precaución se enfoca en los posibles efectos de aquellos plásticos que pasan a través de los sistemas digestivos de estas especies.

Finalmente, no se evidencia bibliografía que relacione el estudio de MP en matrices biológicas a nivel local, y regional, igualmente los efectos e impactos negativos de este material a la salud de las personas, animales y ambiente en un ecosistema de gran importancia como lo es el DRMI la Tatacoa y Polonia. Por tal motivo, este estudio ofrece aporte informativo demostrando la presencia de MP en las cabras de esta zona turística brindando una línea base para la toma de decisiones y gestión apropiada de los residuos sólidos del área.

REFERENCIAS

- [1] C. Y. Serrano Delgado, J. d. C. Reinoso Carrasco y D. F. Orellana Cobos, «Contaminantes emergentes y su impacto en la salud.» Revista de la Facultad de Ciencias Medicas , Ecuador, 2017.
- [2] FAO, «Los microplásticos en los sectores de pesca y acuicultura,» 2017. Recuperado: <http://www.fao.org/3/ca3540es/ca3540es.pdf>
- [3] D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson y . M. Barlaz, «Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments.» *Philosophical Transactions of the Royal Society*, p. 1985–1998, 2009.
- [4] M. P. Fossi, C. Panti , C. Guerranti y D. Coppola, «Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*),» *Marine pollution bulletin*, p. 2374–2379, 2012.
- [5] GESAMP - Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, «Sources, fate and effects of microplastic in the marine environment: a global assessment,» *Microplastic in the Ocean - International maritime organization.*, London, 2015.
- [6] L. Pujo, «Economía circular - microplásticos, la contaminación invisible que invade los mares,» Circulo de políticas ambientales, 2019.
- [7] M. Trainic, J. M. Flores, I. Pinkas, M. L. Pedrotti, F. Lombard, G. Bourdin, G. Gorsky, E. Boss, Y. Rudich, A. Vardi y I. Koren, «Airborne microplastic particles detected in the remote marine atmosphere,» *Communications earth & environment - nature communications*, p. 64, 2020.
- [8] PlasticsEurope, «Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa,» 2019. Recuperado: https://www.plasticseurope.org/download_file/force/3570/632
- [9] C. Cáceres Martínez, A. Acevedo Rincón y L. Sánchez Montano, «Records of plastic consumption of *Tremarctos ornatus* (Carnivora: Ursidae) and *Nasua olivacea* (Carnivora: Procyonidae) in the Tamá Natural National Park, Colombia,» *Mexicana de Biodiversidad*, pp. 839-842, 31 Agosto 2015.
- [10] UNEP , «Year book emerging issues in our global environment,» Division of early warn. and assess., Kenya, 2014.
- [11] B. Filipa , N. Ratcliffe, . V. Otero, P. Sobral, J. Marques, C. Waluda, P. N. Trathan y J. C. Xavier , «Microplásticos en pingüinos gentoo de la región antártica,» *Scientific Reports*, 2019.
- [12] R. Rodríguez, «Mar del plástico: una revisión del plástico en el mar,» *Investigación y desarrollo*, pp. 83-105, 2015.
- [13] G. Ašmonaitė y B. Carney Almroth, «Effects of microplastics on organisms and impacts on the environment: Balancing the known and unknown,» Department of Biological and Environmental Sciences, University of Gothenburg, Sweden, Gotemburgo, 2018.
- [14] CAM , «Plan de manejo ambiental distrito regional de manejo integrado La Tatacoa,» Sept. 2015. Recuperado: <https://www.cam.gov.co/areas-protegidas/planes-de-manejo/category/205-drmi-tatacoa.html?download=1371:pma-drmi-la-tatacoa>
- [15] Alcaldía de Villavieja, «Caracterización Diagnóstica,» 2016. Recuperado: https://villaviejahuila.micolombiadigital.gov.co/sites/villaviejahuila/content/files/000153/7628_for-mulacion-villavieja-diciembre-28-2016.pdf
- [16] Semana, «"Al estar en la Tatacoa, el resto del mundo desaparece": embajador de Alemania,» *Semana*, 2020.
- [17] M. Julie , . J. Baker , G. Foster y Court, «Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment,» Julio 2015. Recuperado: https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
- [18] B. Tintoré Pujol, «Abundancia y distribución de microplásticos y posibles impactos sobre el rorcual común (*Balaenoptera physalus*) en las costas del Garraf,» Septiembre 2016. Recuperado: <http://www.edmaktub.org/wp-content/uploads/2016/11/Distribucion-de-Microplasticos-por-Beatriz-Tintore.pdf>

- [19] C. Boerger, G. Lattin, S. Moore y C. J. Moore, «Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific central gyre,» *Marine Pollution*, n° 60, p. 2275–2278, 2010.
- [20] Lusher, G. Hernandez-Milian, J. O'Brien, S. Berrow, L. O'Connor and R. Officer, "Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: The True's beaked whale *Mesoplodon mirus*," *Environmental Pollution*, pp. 185-191, 2015.
- [21] M. Molina Arias, «No todo es normal, manejo de datos no normales,» 2015. Recuperado: <https://anestesiario.org/2015/no-todo-es-normal-manejo-de-datos-no-normales/>
- [22] J. G. Molina y M. F. Rodrigo, «Pruebas no paramétricas,» *Universidad de Valencia OpenCourseWare*, 2014.
- [23] Portafolio Verde, «Ordenamiento ecoturístico, en el cual se incluya determinar la capacidad de carga real, física, de manejo y efectiva del PNR la Tatacoa y su área de influencia,» Junio 2014. Recuperado: <http://turismo.huila.gov.co/storage/app/uploads/public/5c4/735/d72/5c4735d72f3d6708240412.pdf>
- [24] N. B. Hartmann, T. Hüffer, R. C. Thompson, A. Verschoor, A. E. Daugaard, S. Rist, T. Karlsson, N. Brennholt, M. Cole, M. P. Herrling, M. C. Hess, N. P. Ivleva, A. L. Lusher, M. Wagner and M. Hassellöv, "Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris," *American Chemical Society*, p. 1039–1047, 2019.
- [25] J. F. Provencher, . A. Bond, S. Avery-Gomm,, . S. Borrelle, . E. Bravo, S. Hammer, S. Kuhn, J. Lavers, M. Mallory, A. Trevail and J. van Franeker, "Quantifying ingested debris in marine megafauna: a review and recommendations for standardization†," *Analytical Methods - Royal Society of Chemistry*, p. 1454–1469, 2017.
- [26] F. del Castillo Rodríguez, «Conformado de materiales plásticos,» 2012. Recuperado: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf
- [27] C. Ward y C. Reddy, «Institución Oceanográfica Woods Hole (WHOI),» 2019. Recuperado: <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-luz-solar-degrada-plastico-mucho-mas-rapido-estimado-20191010144940.html>
- [28] M. Ramis, «Color y calor,» 2003. Recuperado: Available: <https://www.artifexbalear.org/color3.htm>
- [29] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia,» Villavieja, 2015.
- [30] R. Andrés y T. Osswald, «Determination of polymers thermal degradation,» *Ingeniería*, vol. 21, p. 19 –30, 2016.
- [31] Sánchez Izquierdo, «Microplásticos y su interacción con los antibióticos,» 2019. Recuperado: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IVAN%20SANCHEZ%20IZQUIERDO.pdf>
- [32] CIEL - Centro de Derecho Ambiental Internacional, «Los plásticos y la salud: Los costos ocultos de un planeta plástico,» 2019, Recuperado: <https://www.climaterra.org/post/los-costos-ocultos-del-planeta-pl%C3%A1stico>
- [33] ONU Medio Ambiente - Organización de las Naciones Unidas , «Plásticos de un solo uso: una hoja de ruta para la sostenibilidad,» ONU ISBN: 978-92-807-3705-9, 2018.
- [34] A. García Regueiro, «Microplásticos en el medio ambiente y su impacto en la cadena trófica,» 2019. Recuperado: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/99246/6/jgarciareguTFM0719memoria.pdf>
- [35] P. Martínez Silva y M. A. Nanny, «Impact of microplastic fibers from the degradation of nonwoven synthetic textiles to the Magdalena River water column and river sediments by the city of Neiva, Huila (Colombia),» Abril 2020. Recuperado: <https://doi.org/10.3390/w12041210>
- [36] Diario La Nación, «La noticia independiente,» 2012. Recuperado: <https://www.lanacion.com.co/plantas-de-agua-residuales-foco-de-contaminacion/>
- [37] H. Quimbaya Calderón, «Caracterización y cuantificación de microplásticos en los sedimentos y la columna de agua del río Magdalena en la ciudad de Neiva,» Corporación Universitaria del Huila, CorHuila., Neiva, Huila, 2019.

Efectos de la vegetación en cañones urbanos en relación con la contaminación atmosférica generada por material particulado

Tomás Vargas Montes¹
Carlos Alberto Riveros Jerez²
Universidad de Antioquia
Colombia

El material particulado es un contaminante atmosférico de amplia relevancia, pues tiene graves implicaciones sobre la salud de las personas; siendo las ciudades una fuente importante y constante de este contaminante y al mismo tiempo un espacio de residencia de un gran número de personas, se convierten en un espacio que presenta una situación crítica para la salud de sus habitantes, por lo que es necesario pensar en formas para controlar y mitigar los impactos del material particulado. En ese sentido, es necesario entender el comportamiento de este contaminante en los escenarios urbanos, por lo que, teniendo esto en cuenta, se realizó un estudio basado en la revisión de investigaciones previas para entender su respuesta frente a la vegetación que se encuentra en los entornos de cañones urbanos. Del estudio se evidencia que el efecto que tiene la vegetación sobre el material particulado en los cañones urbanos no es único y es dependiente de diferentes factores que involucran más que las características de la vegetación y el contaminante. La vegetación interactúa con el contaminante a través de diferentes mecanismos y se ven influenciadas por aspectos como las características de la vegetación, sobre todo de las hojas, apéndices que presentan, forma y organización, la distancia a la que se encuentra la vegetación de la fuente de contaminación, el tipo de vegetación, la forma del cañón que se analiza, el clima de la zona y el tamaño de la partícula, entre otros. Finalmente, se identifica los factores de mayor impacto relacionados con la implementación de medidas pasivas, que usan la vegetación en el contexto urbano en zonas como Medellín, Colombia, donde se presenta casos preocupantes de densificación en altura en barrios como el Poblado y el municipio de Envigado, y se requiere implementar medidas pasivas y activas que en conjunto ayuden a mejorar los niveles de contaminación atmosférica por material particulado.

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental.
Contacto: tomas.vargasm@udea.edu.co
² Profesor asociado.
Contacto: carlos.riveros@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la polución en las ciudades es una problemática de gran relevancia, ya que se ha demostrado que puede generar problemas de salud y agravar las condiciones de salud preexistentes de las personas, especialmente de aquellas con enfermedades respiratorias [1]. El material particulado PM hace parte de esta problemática y se le asocia con: incremento de la tasa de morbilidad y mortalidad en las personas, incremento en el riesgo de contraer enfermedades como asma, malestar de garganta, problemas cardíacos y también con la reducción en la esperanza de vida de las personas [2]. El PM es producido en grandes cantidades en ciudades, sobre todo con gran tránsito vehicular y zonas industriales donde se llevan a cabo procesos de combustión. Se forma también de manera secundaria mediante reacciones químicas que se presentan en la atmósfera, además se genera de manera natural en incendios forestales, erupciones volcánicas y otros procesos naturales.

Debido a sus efectos sobre la salud y siendo la ciudad tanto un espacio donde habitan un gran número de personas, como una fuente constante del contaminante, se ha resaltado la urgencia de pensar en medidas para su prevención, control y mitigación. Sin embargo, la gestión y control del PM es un proceso complejo. El PM es una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire y varían constantemente en tamaño y composición [3]. En el contexto nacional, Medellín se ha caracterizado por presentar episodios de alta contaminación atmosférica principalmente por estar localizada en un valle estrecho y poco ventilado donde el PM, producto de actividades industriales y de transporte junto con el transportado hacia la zona del valle, afecta la salud de los pobladores del Valle de Aburrá, por este motivo se requieren de soluciones que desde el contexto ambiental ayuden a mejorar la calidad del aire. En ese sentido, varios estudios han visto una posibilidad en el uso de la vegetación como una herramienta que puede ayudar a disminuir las concentraciones de contaminación atmosférica ya que los contaminantes, tanto gases como PM, pueden quedar atrapados en las hojas de las plantas por medio de la deposición y otros procesos [4, 6].

Por otra parte, se han reportado en la literatura científica estudios que cuestionan la efectividad de la vegetación para reducir las concentraciones de los contaminantes en los cañones urbanos (vía o calle con edificaciones alineadas a ambos lados de ella) [5, 6]. Se ha observado por medio de experimentos de modelación que, el incremento de la concentración de partículas está relacionado con el incremento de la densidad de la vegetación en un cañón urbano [7]. El PM es clasificado por su diámetro aerodinámico como sigue; partículas ≤ 10 micrómetros se conocen como PM₁₀, ≤ 2.5 micrómetros PM_{2.5}, y ≤ 1.0 micrómetros PM_{1.0} [8]. Las emisiones son dispersadas en la atmósfera por los mecanismos de advección (movimiento predominantemente horizontal por medio de masa de aire) y difusión (movimiento irregular de las partículas que favorece que estas se muevan de los lugares de mayor concentración a las zonas de menor concentración) [9]. Las partículas gruesas se originan principalmente de las fuentes naturales mientras que las más finas se piensa son principalmente de origen antropogénico [6]. Se ha mencionado que el comportamiento del PM puede estar asociado con el diámetro de las partículas; pues se ha observado diferencias, por ejemplo, la concentración de PM₁₀ tiende a variar más frecuentemente, a diferencia de la concentración del PM_{2.5} que es más estable [10].

Se ha descrito al PM como un indicador clave de la contaminación del aire. También, se ha afirmado que la calidad del aire es una de las mayores preocupaciones para las personas viviendo en las zonas urbanas, además se menciona que las emisiones generadas por el tráfico son generalmente la fuente que aporta la mayor polución en las ciudades [11]. Se apunta que el transporte de las partículas atmosféricas sobre la superficie subyacente (árboles, asfalto, edificios) se presenta principalmente en dos maneras: como deposición y como dispersión [12]. También, se señala que la deposición varía con el tamaño de partículas; la deposición de partículas muy finas $\leq 0.1 \mu\text{m}$ es controlada por difusión Browniana (Movimiento errático de las partículas al interior de un fluido, debido a la interacción entre ellas y las moléculas del fluido), las partículas $> 1 \mu\text{m}$ se depositan por impactación, y las partículas $> 10 \mu\text{m}$ son además afectadas por procesos de sedimentación [6, 8, 12].

Luego del proceso de deposición, en el caso del PM, puede ser lavado de las superficies por la lluvia y depositado en el suelo, también puede ser re-suspendido, es decir, ingresar nuevamente al aire luego de la

deposición o el lavado, en mayor o menor medida, dependiendo de la superficie en la que se encuentre. El PM es transportado por el viento a través de las ciudades y arrastrado fuera de ellas o puede quedar allí por medio del proceso de deposición, que en este caso se refiere al asentamiento de las partículas sobre una superficie; su permanencia también puede deberse a la re-circulación de los vientos. El viento en un espacio abierto, a diferencia de la ciudad, no encuentra muchos obstáculos, el aire fluye menos interrumpido permitiendo una buena dispersión de los contaminantes, reduciendo la posibilidad de que se presenten altos niveles de concentración, en las ciudades, por el contrario, el viento encuentra muchos obstáculos (edificaciones, personas, autos, vegetación, etc.) que influyen en su dirección y magnitud. Las edificaciones alrededor de las emisiones son como barreras, que reducen la capacidad del aire de ventilar y de los contaminantes de diluirse [9].

En cañones urbanos, al estudiar estas dinámicas del PM y la vegetación, se deben tener en cuenta muchos factores, por ejemplo, en la definición de cañón urbano nos encontramos con uno de los principales actores de esta interacción [12]. El aspecto del cañón o relación de aspecto (aspect ratio), es un factor que describe la forma del cañón urbano de acuerdo a la relación entre la altura de las edificaciones (H - height) y el ancho de la calle (W - width) [9] y se expresa de acuerdo a algunos autores como H/W [6, 7, 13], mientras que en otros trabajos es definida como W/H [11, 14]; sin embargo, la intención de ambas expresiones es identificar la misma característica. De los trabajos revisados se observó una clasificación (considerando la forma H/W) de las dimensiones de los cañones de la siguiente manera: cañones superficiales/bajos para $H/W \leq 0.5$ (El ancho de la calle supera en dos o más veces la altura de los edificios), medios/de profundidad media para $0.5 < H/W < 2$ (La altura de los edificios no supera ni es superada por el ancho de la calle en dos o más veces), y $H/W \geq 2$ profundos (la altura de las edificaciones es el doble o más que el ancho de la calle) [6] según se ilustra en la Figura 1. De acuerdo a esta clasificación es cómo se entenderán los resultados encontrados que involucren en el estudio la relación de aspecto del cañón urbano.

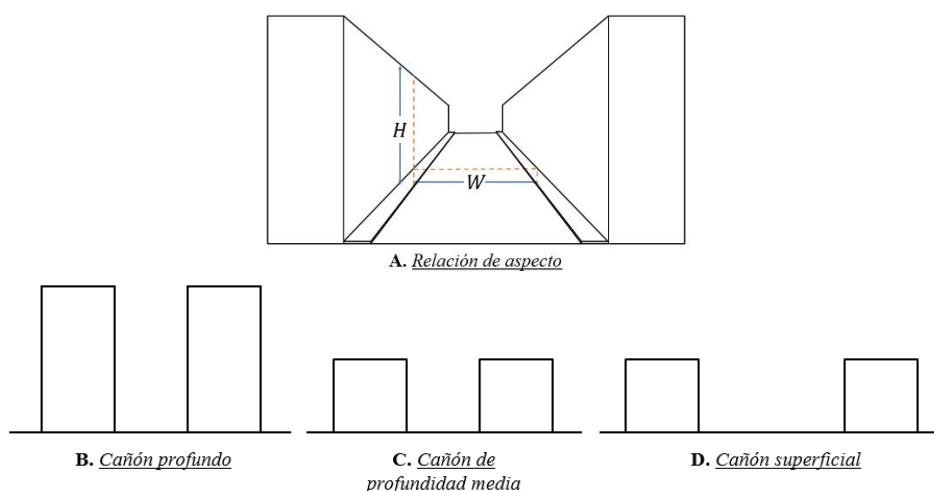


Figura 1. Relación de aspecto de los cañones urbanos y configuraciones generales, A) dimensiones que se toman en cuenta para determinar la relación de aspecto. B) aspecto general de un cañón profundo. C) aspecto general de un cañón de profundidad media. D) aspecto general de un cañón superficial

Cada lado del cañón adquiere un papel cuando el viento toma parte de la interacción. El lado que recibe el viento directamente cuando este entra al cañón se le conoce como barlovento, mientras que el otro lado adquiere el nombre de sotavento, las dinámicas que ocurren alrededor de ellos son diferentes y dependientes de la dirección de ingreso del viento al cañón. En su desplazamiento el PM puede encontrarse con vegetación y ser capturado allí mediante la deposición seca, proceso en el cual las partículas de los contaminantes son depositadas en superficies sólidas y por tanto temporalmente removidas del aire, reduciendo las concentraciones en el ambiente [6]. Con respecto a la deposición, la velocidad con la que sucede se le conoce como *velocidad de deposición seca* y esta refleja la capacidad de las hojas de capturar PM y se define como el inverso de la resistencia total (resistencia aerodinámica + resistencia límite + resistencia de la superficie), según algunos estudios la deposición seca incrementa con el aumento de la velocidad del viento y sugieren este motivo como una explicación al porqué las concentraciones de PM disminuyen con altas velocidades de viento [6, 8].

Todas estas componentes entran en juego al momento de estudiar la interacción entre la vegetación y el PM en un entorno como el cañón urbano, pero es importante entender los aspectos de esta interacción para poder planear estrategias eficientes que permitan mejorar la calidad del aire en las ciudades y tomar decisiones con respecto a las configuraciones con las que se cuentan actualmente. Para este proceso resultan de gran utilidad herramientas de modelado computacional y experimentos en áreas controladas como los túneles de viento, ya que el estudio requiere en sí, reconocer los efectos que se presentan durante la presencia o ausencia de vegetación y realizar una comparación.

El estudio de casos reales al intentar remover o instalar por ejemplo árboles en algún cañón urbano seleccionado requeriría de muchos recursos y tiempo, resultando esto mucho más costoso y una opción menos deseada que utilizar modelos numéricos, como los modelos numéricos de dinámica de fluidos computacional CFD, que mediante la solución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes permiten simular lo que ocurriría dado un escenario bajo condiciones deseadas, permitiendo visualizar aproximadamente cómo se comportan los factores a evaluar.

También se encuentra el túnel de viento como un método para analizar la interacción entre PM y la vegetación en un cañón urbano; este es una construcción de la situación que se desea modelar, en la cual se pueden controlar las variables involucrada, para el caso específico, la relación de aspecto del cañón, dirección y magnitud del viento, ubicación de la vegetación y su presencia. Como ventaja de estos sistemas de modelado, permiten la simulación de estos escenarios que se quieren evaluar, de manera controlada y económica, como desventaja se encuentra que, aunque puedan alcanzar porcentajes altos, no son 100% fieles a la realidad y no representan la totalidad de variables que participan en la situación real.

Tener conocimiento de estos conceptos es un primer paso para entender los estudios realizados sobre el tema, necesarios para poder conectar resultados y conclusiones y llevar a cabo este trabajo. En este artículo se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones relacionadas con el efecto que tiene la vegetación en el nivel de contaminación atmosférica, con un mayor énfasis en el PM y como es esta interacción dentro de los cañones urbanos. Tomando en cuenta los métodos por medio de los cuáles se desarrollan dichas investigaciones, analizando y comparando sus hallazgos y conclusiones relacionadas con este tema, a partir de las cuales se generaron conclusiones propias de la información reunida con el objetivo de generar una serie de recomendaciones que se deben tener en cuenta en la implementación de medidas pasivas que usen la vegetación con el objetivo de mejorar los niveles de contaminación atmosférica en contextos urbanos que han presentado altas densificaciones en altura en los últimos años.

2. MÉTODO

Existe una necesidad creciente a nivel nacional de vivienda en el contexto urbano pero en vista de las limitaciones que se tienen para expandir las ciudades, ya sea por restricciones de espacio físico como valles estrechos o limitaciones económicas en términos de construcción de nueva infraestructura para nuevas redes de servicio, se ha optado por soluciones de vivienda de edificaciones en gran altura que han densificado zonas afectando la morfología con el consecuente incremento de los niveles de contaminación atmosférica por PM. El método que se presenta a continuación consiste en el análisis de estudios recientes donde se evaluó la capacidad de captura de la vegetación de PM en entornos urbanos, en especial estudios que se enfocan en la influencia de la vegetación en las concentraciones de PM en cañones urbanos.

Es importante resaltar que existen un gran número de enfoques para disminuir los niveles de PM en contextos urbanos que van desde políticas públicas, como el control de emisiones de industrias y transporte, y restricciones de movilidad dependiendo del tipo de vehículo y la zona, medidas que buscan mitigar la fuente emisora de PM pero episodios recientes en Medellín, como el ocurrido en 2020 en pleno confinamiento por la pandemia del Covid-19, han mostrado que los altos niveles de contaminación se deben también a factores externos, asociados incluso a quemas en zonas alejadas en el valle de Aburrá, que finalmente causan incremento en el nivel de contaminación atmosférica, por este motivo este estudio busca complementar las medidas anteriormente mencionadas con enfoques pasivos que usen la vegetación considerando las limitaciones que se pueden presentar en su implementación por el alto nivel de densificación en altura que se puede presentar en contextos urbanos.

3. RESULTADOS

3.1 Vegetación y PM

La captación y reducción de la concentración de los contaminantes atmosféricos, ha sido aceptado como un servicio ambiental más ofrecido por la vegetación [15]. Las plantas remueven los contaminantes y mejoran la calidad del aire absorbiendo gases vía sus estomas y remueven también por medio de la deposición de los contaminantes en la superficie de sus hojas o por procesos de dispersión [6, 7, 16]. El PM que es retenido se clasifica de acuerdo a su tamaño también en las siguientes tres categorías: Fino (0.2-2.5 μm), grueso (2.5-10 μm), y grande ($> 10 \mu\text{m}$). La captura de PM por parte de la vegetación se da principalmente a través de las hojas, esto es posible gracias a las diferentes estructuras con las que cuentan las hojas, lo cual varía de especie a especie y determina su desempeño para capturar PM.

Se ha observado que en general especies con hojas más pequeñas, anchas y rugosas capturan más PM que las hojas que son lisas y suaves [8, 16, 17]. Los tricomas (crecimientos o apéndices como: pelos, escamas, papilas) incrementan la rugosidad y el área de contacto con el PM, además disminuyen el porcentaje de PM re-suspendido por efectos del viento [8]. También se ha observado que el PM fino se deposita más frecuentemente en la cera epicular de las plantas, en contraste con el PM de tamaño más grande [17]. Por otra parte, se ha observado que la hidrofobicidad que ofrece la cera epicular reduce la capacidad de mantener el PM que ha sido capturado [8].

Otras características relevantes para la captura de PM detectadas han sido la presencia de micro picos o colinas de 1-2 μm en altura en la superficie de la hoja, especialmente PM_{2.5}, adicionalmente la presencia de tomento, una forma de hoja tipo lanza y un peciolo corto son características que favorecen la captura y retención de PM, entre más compleja la estructura del follaje, es más efectiva la captura de partículas [8], [17]. La vegetación modifica las concentraciones de PM circundante ya sea por captura del contaminante o por la alteración de los flujos del viento, por la forma en la que están organizados los individuos e incluso cómo se organizan las hojas en cada individuo [8].

Al incrementar la densidad de las hojas para alcanzar mayor deposición, también, se puede dar el incremento de la turbulencia, intercambio y combinación de vientos, potenciando la dispersión. Pero una densidad muy elevada puede derivar en la reducción en la velocidad del viento reduciendo la calidad de la ventilación, adicionalmente el viento tenderá a evitar, en lugar de atravesar la barrera vegetal, reduciendo también el contacto del PM con parte de las hojas al interior de la estructura vegetal [7, 11, 15, 16].

Adicionalmente factores como la proximidad de la vegetación a la fuente, altura de la planta, edad, porosidad de la copa en árboles, complejidad de brotes, densidad de área foliar, velocidad de deposición, entre otras más, tiene impacto en la capacidad de captura, por lo anterior se puede entender que la variación en la deposición en diferentes plantas depende de las características macro y micro morfológicas que presente [6, 15, 16, 17]. Además de los factores mencionados anteriormente, esta interacción también se ve afectada por factores espaciales como el tipo de entorno urbano donde se ubica, factores meteorológicos como el régimen de vientos, los eventos de lluvias, estación climática del año y hasta las características de las propias partículas (concentración, diámetro, composición, etc.) también se debe tener en consideración el tiempo de deposición, momento de saturación (cuando una hoja no puede captar más PM, el cual depende de la especie de la planta) [6, 15, 17].

En un estudio realizado en Guangzhou (China), las capacidades de los árboles urbanos estudiados para retener el polvo destacaron en la temporada seca en comparación con su desempeño en la temporada de lluvias, lo cual estaba de acuerdo con las concentraciones atmosféricas [6]. También se ha observado que la retención tiene un ciclo diurno tal, que se observa más eficiente durante las horas de la mañana y decrece luego del medio día y en las horas de la tarde, se cree que esto se debe a que cerca de las horas del mediodía los vientos, más frecuentes, y algunas actividades humanas, promueven la re-suspensión del PM ya capturado en las hojas [17]. Es importante mencionar que este proceso de captura del PM puede reducir la función de las estomas y causar daño a las ceras epiculares [8].

La planta también puede experimentar alteración de procesos fisiológicos como la fotosíntesis, esto la hace menos resiliente y vulnerable a otros problemas [18]. Al estudiar el efecto de la vegetación sobre el PM, se han analizado diferentes escalas; el efecto que tiene el individuo, el efecto que se tiene en rodal (grupo de plantas en un terreno que comparten una característica en común), y a escala regional. Los cañones urbanos se encuentran en la escala de rodal y se puede entender el funcionamiento específico de la interacción al analizar el fenómeno a escala de individuo; a escala regional los estudios consideran los cambios estacionales, variaciones espaciotemporales, distribución en la fuente y daños a la salud. En varios estudios se ha observado que el incremento en la cobertura de bosque urbano es beneficioso para reducir las concentraciones de PM, se han destacado las coníferas como una especie apropiada para llevar a cabo esta remoción [8, 16].

Es importante resaltar que, a la escala de interés (cañones urbanos), es donde se han advertido efectos adversos. El flujo del aire y el impacto que pueden tener los árboles se presentan muy diferentes entre entornos como los cañones urbanos y entornos más abiertos como las carreteras [16]. En la escala de rodal, se estudia el efecto que tiene el rodal en las direcciones vertical y horizontal; en la dirección vertical se analiza principalmente la deposición seca del PM, mientras que en la dirección horizontal se estudia el tipo de vegetación, configuración y diseño de edificios y calles, además de la distancia a la fuente. A escala regional se evalúa la relación entre la cantidad de cobertura vegetal y las concentraciones de PM [8]. Para el trabajo actual la escala de mayor interés es a nivel de rodal.

Desde la dirección vertical se entiende que la vegetación remueve el PM principalmente por el proceso de la deposición seca, no solo a través de la superficie de la hoja, sino también en las demás partes que la componen, como en la superficie del tronco, tallo, y ramas. Este proceso se puede entender y valorar conociendo la velocidad de deposición y para ello se debe tener en cuenta factores como la variación diurna, que determina en general la temperatura en la capa límite atmosférica que, a su vez domina la turbulencia y con ello los flujos ascendentes y descendentes.

Junto a esto se debe tener presente el tipo de superficie que se está evaluando, el tamaño de las partículas, la estación y condiciones climáticas del momento para calcular la velocidad de deposición del PM [8]. En la dirección lateral se estudia la configuración de la vegetación y se estudia también el diseño de las construcciones, por ejemplo, un estudio reportó que los árboles en conjunto con las edificaciones en un cañón urbano de acuerdo a su configuración pueden incrementar la turbulencia o perturbar el flujo del aire cerca del dosel [8]. Adicionalmente, cuando la vegetación y las edificaciones recibe el flujo del viento predominante de manera perpendicular, separa el aire formando vórtices de viento conocidos como remolinos, los cuales ayudan a rebajar las concentraciones de PM_{2.5}, para estas configuraciones se ha indicado un mejor rendimiento si hay más vegetación y menos edificaciones.

En contraste, otros estudios señalan que la configuración árbol-edificación restringe el flujo del aire, cambia y reduce la velocidad del viento lo que puede conducir a la concentración de partículas [8]. Se ha descrito que agujeros en la barrera vegetal, por un espacio muy amplio entre árboles o árboles muertos, pueden incrementar las concentraciones, a través de una especie de efecto embudo, donde el viento dirige todo el PM por estos caminos, o al estancar el flujo de aire [16]. En cañones urbanos la presencia de árboles ha sido reportada por varios estudios como perjudicial, pues registraron un incremento en la polución. De estos estudios se concluye que las formas de las copas de los árboles, las dimensiones de estas y otras características, tienen un impacto sustancial en la distribución del PM [8].

Sin embargo, en otro trabajo enfocado en identificar el efecto aerodinámico que tenían los árboles en las concentraciones de contaminantes en cañones urbanos sugiere que, el grado de porosidad de la copa y la densidad del rodal no son factores realmente cruciales para afectar las concentraciones promedio que se medían en las paredes de sotavento y barlovento dentro del cañón urbano. Allí [11], haciendo referencia a investigaciones anteriores, afirman que cuando el volumen de la fracción de poro de las copas de los árboles cae bajo cierto umbral, no se observan cambios en las concentraciones de los contaminantes. Además, las concentraciones máximas en el centro del cañón no se ven fuertemente afectadas. Basados en estos hallazgos el estudio concluye que, aunque la presencia de árboles dentro del cañón tiene un efecto considerable, el principal elemento responsable de las concentraciones es el aspecto que el cañón presenta.

Adicionalmente se estudia el papel de la distancia que hay entre la fuente del contaminante y la vegetación, distancia entre la misma vegetación y distancia con las edificaciones. Se ha observado que el efecto de remoción aumenta con la cercanía entre árboles en un terreno abierto, pero esto no sucede en un entorno cerrado como los cañones urbanos [8]. Además, la deposición se expresa en parte en función de la concentración, y la concentración decrece a mayor distancia de la fuente [7]. Por ello, trabajos han sugerido el uso de arbustos, en lugar de árboles, ya que con sus hojas asomándose desde su base cerca del suelo, demuestran un gran desempeño en la retención al encontrarse más cerca de las fuentes de polución, como en calles, estos contienen el contaminante desde su origen, a diferencia de los árboles [7, 12, 16].

Gracias a la información anterior se puede identificar un ciclo de liberación y captura para esta interacción como se ilustra en la Figura 2, ya se han identificado las fuentes, los procesos de transporte, la forma de captura y se han mencionado que se pueden dar procesos de re-suspensión o lavado lo que se da cuando se presenta un viento fuerte, este no solo promueve la deposición del PM, también causa la re-suspensión del PM capturado por la vegetación, a la atmósfera [6, 15].

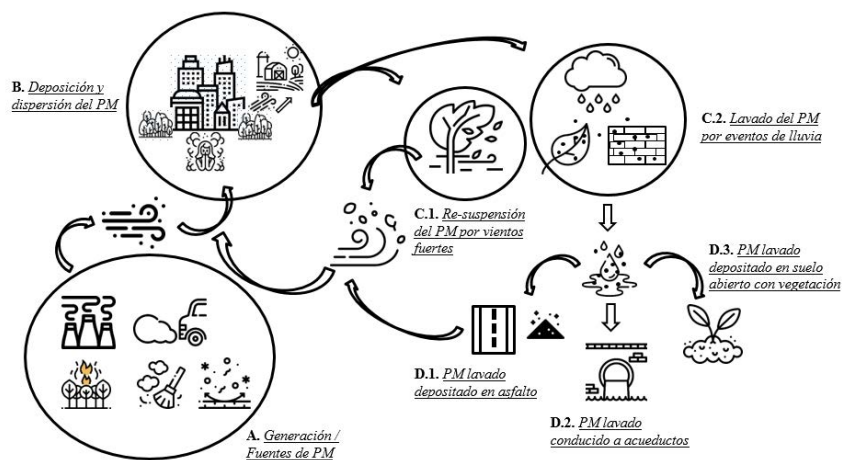


Figura 2. Relación de aspecto de los cañones urbanos y configuraciones generales, A) dimensiones que se toman en cuenta para determinar la relación de aspecto. B) aspecto general de un cañón profundo. C) aspecto general de un cañón de profundidad media. D) aspecto general de un cañón superficial. (elaboración propia) Ciclo de generación, captura y deposición del PM, en sus diferentes procesos. A) fuentes de PM suspendido. B) Transporte por el viento por el entorno urbano y dispersión a otros entornos. C) procesos luego de re-suspensión y lavado luego deposición sobre vegetación y otras superficies. D) destinos finales del PM luego de un proceso de lavado [17]

Si un evento de lluvia se presenta el PM puede ser lavado y depositado en el suelo o ser llevado al sistema de drenaje [6, 17]. Al PM llegar al suelo, se reducen las posibilidades de ser re-suspendido pues la materia orgánica se descompone y el material inorgánico se acumula [6]. Esto es, si el PM escurrido llega a vegetación como pasto o suelo abierto, entonces contará con mayores posibilidades de ser inmobilizado, en caso de llegar a pavimento este tiende a ser re-suspendido [18]. Este proceso de lavado es esencial para considerar que el ciclo tiene un cierre, ya que, de no darse este proceso, el material que se deposita en la superficie de las hojas permanece allí únicamente para ser re-suspendido, adicionalmente, las hojas tienen un punto de colmatación donde no podrán recibir más PM, se ha mencionado es aproximadamente 24 días [17, 18]. El lavado libera a las hojas de parte de lo acumulado renovando su habilidad para capturar PM [18]. También se ha observado que las partículas grandes de PM son lavadas en mayor cantidad comparado con el PM grueso y fino.

Por lo anterior, aunque a la hora de captar PM las especies con hojas con características como una superficie lisa, sin vellosidad presentan menor eficiencia, se ha rescatado este aspecto como favorable para el proceso de lavado, pues incrementa la cantidad de PM que llega al suelo y es atrapado [17]. La remoción por parte de la lluvia no es completa, esta remoción depende de la especie y de la intensidad de la lluvia. Se han referenciado estudios que encontraron una reducción de 28% y 48% del PM acumulado fue lavado con lluvias de 10.4 mm y 31.9 mm respectivamente. En [17] se menciona que en un estudio por medio de simulaciones de lluvia controlada se encontró que el tratamiento pudo remover hasta el 70% del PM retenido en una hoja de *Euonymus Japinicus*, en el estudio la remoción fue incrementando con el incremento de la lluvia, cuando el volumen de la lluvia excedió el valor de 12.5 mm, la remoción se estabilizó.

Ahora cuando se planea hacer uso de la vegetación como herramienta para mitigar el PM entonces se debe tener en cuenta los efectos contrarios que también puede tener. Para explicar este punto se ha hecho referencia a un trabajo enfocado en la evaluación del efecto de los árboles en cañones urbanos, analizando los diferentes casos que se pueden presentar, variando la relación de aspecto del cañón, la configuración de los árboles y el número presente dentro del cañón incluyendo el caso donde no se presentan árboles, esto se realizó a través de modelos numéricos y físicos de túneles de viento recreando los espacios a evaluar, en los resultados del estudio se observó que en todos los casos (con el viento acercándose perpendicularmente al cañón), se presentaron entre moderados a grandes incrementos en el muro que se encontraba a sotavento y leves a moderadas reducciones en el muro a barlovento, en comparación con el escenario sin árboles, esto fue explicado debido a la modificación en el intercambio y arrastre dentro del cañón que propició la presencia de los árboles [11].

Lo anterior evidencia diferencias entre los efectos que tiene la vegetación incluso al interior del cañón y su relación con el comportamiento del viento.

3.2 Métodos de análisis

Para analizar el efecto de la interacción entre la vegetación y el PM en los cañones urbanos se han utilizado diferentes métodos de modelación y medición que han permitido su estudio, para analizar el PM capturado y lavado desde las hojas de la vegetación se utilizan métodos como el leaf washing method, aerosol regenerator method, Scanning electron method SEM y el supplemental ultrasonic cleaning UC weighting method [8, 17]. Cada método permite conocer aspectos interesantes del proceso estimando siempre la capacidad de captura del PM de la vegetación, incluso con el SEM se evalúa la correlación entre las características de la hoja y la cantidad, composición y características morfológicas de las partículas capturadas y lavadas [8, 17].

Al momento de evaluar la capacidad de captura de las hojas se debe tener presente que los participantes de esta interacción son dinámicos y cambiantes, un ejemplo de esto es la cera epicular la cual, parte de ella puede disolverse durante el lavado y esto causar la sobre estimación de la capacidad de retención de la muestra que se evalúa [17]. En el caso de modelos es necesario tener muy en cuenta el tipo de cobertura, el índice de área foliar, información meteorológica (temperatura del aire, velocidad del viento, la precipitación) y la información de la calidad del aire, ya que estos son los principales factores que influyen la remoción de PM en el cálculo realizado con estas herramientas [8, 14].

También se deben tener siempre presentes las suposiciones que se toman al momento de utilizarlas, una de importante relevancia sería, por ejemplo, como se menciona en [7], tomar un escenario donde todas las hojas de la vegetación simulada, tendrán igual contacto con la contaminación, lo cual no es cierto, entre otros factores, el viento siempre busca el camino de menor resistencia para transitar, y en general tiene tendencia a evitar los obstáculos en lugar de atravesarlos lo que no ofrece la posibilidad de que todas las hojas de una estructura vegetal tengan igual contacto con los contaminantes, igualmente se ha mencionado que un aspecto que poco se tiene en cuenta, pero con influencia, es la turbulencia generada por el tránsito vehicular [19].

De los estudios evaluados, se encontró que hay una gran diversidad métodos que son utilizados para evaluar el fenómeno y se evidencia falta de un protocolo a seguir, este factor y que las investigaciones fuesen llevadas a cabo en diferentes lugares, diferentes épocas del año y con diferentes consideraciones dificulta la comparación entre los resultados [17].

Sin embargo, se ha notado un generalizado uso de modelos computacionales de dinámicas de fluidos CFD, como ENVI-met o OpenFOAM, para estudiar la dispersión y deposición en el fenómeno [6]. Se ha señalado, además, que para poder tener una comprensión más completa del efecto de la vegetación sobre la calidad del aire es necesario complementar estos análisis con métodos valorativos [6, 14, 18]. Aun así, informan que son pocos los estudios que investigan la relativa contribución de la dispersión y la deposición en relación a las estructuras verdes [6]. incluso se ha recomendado la integración de los modelos al proceso de diseño y planeación urbana [7].

3.3 Influencia de las edificaciones

Los edificios son un elemento importante de la interacción que es relevante analizar. Se ha observado que la dirección con la que ingresa el viento al cañón afecta las concentraciones dentro de él [14], en general, el flujo de viento perpendicular presenta bajas velocidades y el intercambio con el aire al exterior del cañón es poco [7]. Vientos que ingresan de forma paralela al sentido del cañón, el cambio en el flujo del viento es insignificante, la velocidad del viento en el cañón es similar a la que presentan los vientos sobre el cañón, no se observó tampoco la formación de zonas de barlovento o sotavento. Cuando el flujo ingresa de manera oblicua, generalmente esto conlleva a una buena ventilación presentándose zonas de barlovento y sotavento; para este tipo de flujos entre menor sea la relación de aspecto (cañones poco profundos), más es la reducción de las concentraciones de los contaminantes, para cañones con árboles se da la misma relación, pero a un nivel menor [7].

La relación de aspecto tiene una fuerte influencia en los patrones de viento y sus efectos, entre más grande es H/W menos se mezcla el aire, reduciendo la ventilación en el cañón. Flujos de vientos perpendiculares en cañones profundos crean una zona con mala ventilación y vientos lentos con poca turbulencia, llevando al estancamiento de contaminantes y promoviendo concentraciones más altas [7]. Las edificaciones tienen un efecto sobre la dilución y ventilación de los contaminantes, generalmente este efecto es negativo. La dinámica de las temperaturas que presentan las fachadas es otra de las características que influye en cómo afectan la dispersión [9].

Tomar en cuenta las edificaciones como factor influyente dentro de la concentración de los contaminantes no es algo aceptado por todos, ya que se piensa que la contaminación del aire es un problema a nivel atmosférico donde las estructuras y su forma no tienen efecto directo, esto último es cierto, pero también es cierto que si tienen efecto indirecto sobre las concentraciones y no tomar en cuenta este factor no permitirá entender al completo la interacción y el efecto de la vegetación sobre el PM, se ha afirmado incluso, que la correcta optimización del diseño urbano puede ayudar a dispersar efectivamente la contaminación atmosférica [20]. Por ejemplo, la altura de las estructuras afecta la velocidad de los vientos, acelerando o reduciendo su velocidad, las ciudades son heterogéneas en este aspecto generando zonas de vientos fuertes y calmos [20].

Esto sugiere el efecto indirecto pero crucial de las edificaciones en las concentraciones del PM y otros contaminantes en el cañón. Además, y como se ha mencionado antes, la deposición trabaja en función de la concentración, la cual a su vez está influenciada por los vientos, por lo que también indirectamente condiciona cómo se dará la interacción entre la vegetación y el PM. De la literatura se ha encontrado que se deben considerar tres aspectos principales del espacio urbano y cómo afectan los flujos de viento: la densidad urbana, la altura promedio y la circunferencia de las edificaciones.

1. El viento se ve afectado por la densidad de las edificaciones de manera inversa, es decir, a más edificios menor velocidad presentará el viento lo que conlleva a una mala ventilación en la zona e incrementa la concentración de los contaminantes [20]. Adicionalmente en áreas altamente pobladas el intercambio entre el aire que fluye al nivel de la calle y el que fluye por encima de los techos y terrazas es muy poco [19]. Con pocas edificaciones presentes el viento se desplaza a mayores velocidades, pero si la velocidad es muy alta puede derivar en la re-suspensión y levantamiento de PM, por esto se debe buscar el equilibrio, comprendiendo este aspecto del espacio urbano.
2. Con la altura promedio de las edificaciones el viento dentro del cañón responde tal que, a mayor altura promedio mayor velocidad adquiere el viento, factor que puede incrementar las concentraciones por re-suspensión y si la altura promedio es baja, el viento adquiere velocidades bajas llevando a la acumulación y concentración de PM [20]. Similar a la densidad urbana, la altura promedio contempla un rango idóneo que debe buscarse para hacer óptimas estimaciones y mejores planes.
3. Por último, la circunferencia o cerramiento del espacio urbano dificulta la dispersión de contaminantes como sigue: entre más alto sea el nivel de la circunferencia que se presente, más se dificulta el ingreso del viento a la parte más interior del lugar, formando una zona sin viento, perfecta para la acumulación de PM, la circunferencia no presenta un rango óptimo a diferencia de los otros aspectos [20]. La

comprensión de estas características del espacio urbano facilita el diseño y la aplicación de estrategias óptimas que pueden mejorar la dispersión.

En [20] se indica que de acuerdo con la escala de Beaufort (por la cual se clasifican la velocidad de los vientos) y llevada la velocidad del viento a nivel peatonal; que la velocidad del viento adecuada se encuentra entre el rango donde sea mayor a 1.0 m/s y menor a 5.0 m/s, las velocidades por debajo de ese rango representan un viento con fuerza insuficiente para arrastrar los contaminantes y generar una buena dispersión, por otra parte velocidades mayores pueden generar más PM por medio de re-suspensión y levantamiento de polvo. Además, se alienta a proteger e interconectar los espacios naturales para mejorar la calidad del aire y generar un entorno más cómodo, pues esto mejorará los flujos de aire fresco e intercambios con los alrededores de las áreas urbanas.

3.4 Influencia del viento

El viento es sin dudas la cadena que une a todos los actores que interactúan en las dinámicas que se analizan en este trabajo. El viento es el que transporta los contaminantes, y de su comportamiento depende en gran medida el nivel de concentración de estos [20]. El viento no responde a las barreras físicas con las que se encuentra de la misma manera, e incluso puede no responder de la misma manera aun si se enfrenta a un mismo obstáculo, debido a que la respuesta cambia con la dirección desde la cual la enfrenta el viento.

De hecho, en los cañones urbanos las concentraciones dependen mayormente de la dirección del viento y de la relación de aspecto del cañón, y menos de la porosidad de la copa de los árboles y la densidad del rodal [14]. Un trabajo a través de simulaciones en túneles de viento y simulaciones numéricas evaluó el efecto que tenía la dirección del viento en el comportamiento de las concentraciones en cañones urbanos con plantas, se encontró que en todos los casos que se presentaban árboles en el cañón se presentaron incrementos en las concentraciones, las variaciones dependieron de la dirección del viento [14].

Analizando diferentes tipos de flujos de aire entrantes en los cañones urbanos se descubrió que las concentraciones se ven más potenciadas por flujos que ingresan de forma oblicua al cañón, con respecto a los que ingresan perpendicularmente [7]. Las concentraciones de contaminantes arrastradas en el viento se ven especialmente reducidas por la vegetación cuando el viento viene desde la carretera y va hacia la vegetación, en zonas abiertas [6]. Pero se ha observado que la habilidad de la vegetación de capturar el PM puede actuar en contravía de la calidad del aire cuando árboles se ubican en cañones urbanos y los vientos fluyen a gran velocidad, causando re-suspensión y elevando las concentraciones a un punto en que es opacada la capacidad de captura de las plantas, este efecto se ve con mayor intensidad en los cañones profundos y en las fachadas que se encuentran a sotavento [7].

Por otra parte, un estudio que cuantificaba la efectividad de las barreras vegetales para la reducción de las concentraciones de black carbon usando un modelo CFD, encontró que el promedio de reducciones se vio, sobre todo, sujeto a la velocidad de deposición tal que, mayor deposición a mayor velocidad del viento. Además, se ha observado que, bajo vientos paralelos al sentido de la vía, se presentan efectos aerodinámicos positivos de parte de los árboles, con una despreciable contribución a la deposición, lo que sugirió que el impacto de los árboles depende del lugar y las condiciones climáticas específicas [6].

Con respecto a la capacidad de re-suspensión que puede tener el viento, se ha reportado que hasta 76 % del PM capturado en las hojas puede ser re-suspendido por vientos fuertes, esto de acuerdo a un estudio que se realizó en Bélgica. Debido al viento la cantidad de PM en las hojas es una variable muy dinámica en el tiempo [17].

La vegetación además de promover la dispersión y reducir la velocidad del viento puede promover el intercambio del viento al interior del cañón, con los vientos al exterior de este, en este sentido promueve a la ventilación y dilución del contaminante, efecto que logran por las propiedades que presenta la vegetación enfriando el entorno y generando vórtices descendentes, entonces el aire más fresco alrededor de la vegetación en los techos fluye dentro de los cañones y el aire alrededor de la vegetación en el fondo del cañón fluye a las capas medias del cañón [9].

3.5 Cañones urbanos y vegetación

Las ciudades son inmensos complejos con un gran número y diferentes configuraciones de cañones urbanos. Las emisiones que se realizan cerca del suelo no se diluyen ni son removidas con facilidad, y tienden a permanecer a nivel de la calle resultando en grandes concentraciones en el lugar [19]. El aspecto del cañón es una de las características más determinantes con respecto a cómo se presentarán las dinámicas del PM en él, su aspecto es mucho más importante que la presencia de árboles ya que influye enormemente cómo será el régimen de vientos que se observará en el cañón, esto determina el efecto que la vegetación tendrá sobre los contaminantes.

Por ejemplo, dentro de la literatura revisada, se comparan escenarios con vegetación de características similares en cañones urbanos con diferente relación de aspecto y se observaron resultados muy diferentes; describen que a medida que la relación de aspecto y la densidad de la vegetación incrementa, la velocidad del viento es reducida, mientras que en cañones urbanos anchos se dan reducciones de PM significantes cerca de árboles y arbustos, la perturbación del flujo del viento se observa en todo lo ancho de los cañones más profundos [7].

El efecto de los árboles a escala del cañón urbano se determina también debido a su organización dentro del cañón, pero lo que determina qué tan relevante será su efecto es la relación de aspecto del cañón (H/W). el efecto perjudicial o benéfico que resulta de la presencia de la vegetación, viene determinado por su interacción con la forma del cañón urbano y las características del viento que ingresa en este [9]. Este efecto también depende del contaminante en cuestión. Diferentes configuraciones entre la forma del cañón y la vegetación, tienen diferentes impactos sobre los diferentes contaminantes.

En un estudio que analizaba los efectos aerodinámicos de los árboles en las concentraciones de los contaminantes en cañones urbanos, se encontró que, entre más ancho sea el cañón en comparación con su altura, es decir cañones bajos ($H/W < 0.5$), el efecto de los árboles es menor. En el mismo estudio evidenciaron que el efecto de los árboles sobre el escape de los gases de los vehículos se ve levemente potenciado por vientos de baja velocidad en comparación con vientos de alta velocidad [11]. La relación de aspecto también tiene influencia en las temperaturas dentro del cañón, se ha observado que, entre más grande sea H/W es mayor la reducción de temperatura por causa del incremento de densidad de área foliar [9]. Además, los flujos de aire en los cañones urbanos son resultado de varios vórtices que se forman de acuerdo a su geometría (ancho de la calle, largo de la calle y altura de las estructuras) [14]. Estos vórtices pueden ser menguados por la presencia de vegetación al interior del cañón y empeorar la ventilación [19].

En [6] se menciona que para reducir las concentraciones de PM en entornos urbanos se necesitaría una gran área de vegetación, y de allí se evidencio otro motivo que es determinante para la inclusión de vegetación como árboles y arbustos dentro de un cañón urbano, la viabilidad de ubicarlos: si se cuenta con el espacio para plantarlos, terreno adecuado, ingreso de luz solar, etc. Muchas de estas limitaciones se pueden solventar con el uso de otro tipo de estructuras verdes como muros verdes o los muros vivos y pueden ser adecuadas a las superficies verticales que abundan en los cañones urbanos [6].

El diseño de planes que involucran el uso de vegetación para mejorar la calidad del aire en cañones urbanos es complejo y dependiente del contexto específico de donde se planea implementar, se deben considerar los factores de la forma del cañón, características de la vegetación, comportamiento del viento, conexión con otros cañones, comportamiento de fuentes emisoras y más [6]. Es un campo en el que aún falta mucha investigación. No obstante, se han encontrado algunas recomendaciones como no usar árboles muy densos en cañones profundos [7].

La implementación de métodos numéricos y experimentales para la valoración, planeación antes de la implementación de árboles en cañones urbanos para la mitigación es significativamente útil [19]. La implementación de vegetación para la mejora de la calidad del aire en cañones urbanos debe ser pensada para cada lugar en específico. La vegetación tiene capacidades para ayudar a mejorar la calidad del aire en las ciudades, pero no es una solución total para la contaminación del aire. La vegetación debe ser una herramienta que promueve la dispersión que adicional y pasivamente capta los contaminantes [6].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, las plantas tienen la capacidad de capturar el PM y otros contaminantes a través de sus hojas, y los árboles son bastante comunes en el entorno urbano, sin embargo de acuerdo a lo que se ha encontrado, estos pueden causar efectos adversos con respecto a la calidad del aire debido a algunas de sus características, pero no se pueden remover simplemente así de los cañones urbanos, la vegetación no solo provee el servicio ecológico de captura de PM y otros contaminantes, también provee servicios como elementos estéticos, motiva a la actividad física y ayuda a reducir la obesidad, mejora la salud mental, puede incrementar el valor de terrenos, permite reducir el calor, ofrece control de la escorrentía superficial, también (dependiendo de la densidad, altura y grosor) puede actuar como barrera de sonido. Por otro lado, también agregan vulnerabilidad a incendios o pueden volverse obstáculos para la vista de los conductores [16].

El valor de la capacidad de captura de PM de la vegetación no es despreciable y es muy aprovechable que se debe saber implementar, así la mejor opción se considera, no es la eliminación de la vegetación de las ciudades sino, realizar y aplicar una mejor gestión. La mayoría de los estudios consultados al referirse a la vegetación urbana hicieron referencia a árboles y algunos pocos mencionaron los arbustos, además de estos dos tipos hay también alternativas como los techos, muros y pantallas verdes que son posibles encontrar en ambientes urbanos como Medellín según se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Tipos de estructuras verdes (árboles, arbustos, fachadas verdes, muros vivos, pantallas verdes y estructuras combinadas)

Son escasos los estudios que observan y analizan los efectos e interacciones con el PM en los cañones urbanos de los tipos de vegetación alternativas a los árboles, sin embargo se conoce que estos otros tipos de vegetación también tienen efectos positivos y negativos sobre la calidad del aire en los cañones urbanos, sus efectos dependen mucho de la forma del cañón urbano y su relación de aspecto, de las condiciones climáticas particulares y de las características de la especie vegetal, pero aun así abren un abanico de posibilidades para responder a los diferentes condiciones específicas de cada lugar y a cañones con diferentes relaciones de aspecto, otro aspecto relacionable es, su configuración dentro del cañón tiene gran influencia en su desempeño.

Esto le agrega versatilidad a los planes que involucran la vegetación para la mitigación de PM en los cañones urbanos, por ejemplo, las paredes, los techos y las pantallas verdes se presentan como buenos candidatos para aquellos cañones urbanos que presenten espacios reducidos y carezcan de espacios para plantar árboles o arbustos [6]. En este punto es importante resaltar que no existe una sola solución al problema de calidad del aire en entornos urbanos, es posible encontrar por ejemplo propuestas como la creación de zonas de baja emisión LEZ, implementadas en varias ciudades europeas como políticas públicas para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas.

Un ejemplo reciente de estudio es la LEZ implementada en la zona céntrica de Plaza del Carmen en Madrid en esta zona no había sido posible el registro de valores de contaminación atmosférica de NO_2 , desde la década de los años 80, por debajo del valor máximo permitido por la Organización Mundial de la Salud de

40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados de un programa de monitoreo de registros diarios efectuados en el período 2015-2019 en Plaza del Carmen permitió identificar reducciones en las concentraciones de NO_2 entre el 23% y el 34% con respecto a los valores que se registraron antes de la implementación de la LEZ de Plaza del Carmen [21]. Esta situación contrasta con el estudio realizado por [22], donde se analizaron mediciones de PM en el período de 2010-2017 en 11 zonas metropolitanas de Sur América, incluyendo la zona metropolitana del Valle de Aburrá, identificando que Medellín presenta los valores más altos de $\text{PM}_{2.5}$ y valores de NO_2 que se han mantenido constantes con un valor promedio de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor muy cercano al valor límite anteriormente reportado.

En este contexto es importante la implementación de medidas pasivas que usen la vegetación y que no necesariamente se enfoquen en especies existentes o siembra de árboles en las zonas urbanas a intervenir, sino que hagan uso de las diferentes variedades de especies o configuraciones que se tienen disponibles en la naturaleza, por lo que derivado de este estudio se puede realizar algunas recomendaciones para las adecuaciones de estructuras verdes necesarias en zonas urbanas que ayuden a mejorar la calidad del aire:

- Los árboles necesitan de espacio para su plantación, hay una gran variedad de especies en todas las regiones del planeta, tienen una altura considerable, la ubicación de sus hojas se encuentra separada del suelo, algunas especies presentan espacios entre sus grupos de hojas, estos pueden alterar los flujos del viento, el intercambio de masa y la turbulencia de los flujos, y en ello afecta las concentraciones de contaminantes [14]. Pueden reducir la velocidad de los vientos y promover las concentraciones de los contaminantes propiciando la interacción con los transeúntes [6].
- Los arbustos presentan sus hojas en toda su extensión desde el suelo hasta su máxima altura lo que ha sido resaltado como una ventaja frente a los árboles pues esto les permite estar más cerca de las fuentes de polución en los cañones urbanos que son principalmente los vehículos y el polvo que se levanta del suelo, las dimensiones como el grosor, altura y ancho de una barrera tiene un buen rango de maleabilidad y ofrece la posibilidad de moldearlo a las necesidades para adaptarse mejor a las condiciones específicas del lugar donde se piensa implementar, sin embargo, se han observado que mejores tasas de reducción se alcanzan con arbustos altos y con baja permeabilidad, arbustos continuos sin espacios entre ellos [6].
- Los techos verdes además de ofrecer servicios ecológicos ofrecen beneficios económicos y mejoran/suman al componente de sustentabilidad del edificio, la infra-estructura de los techos verdes y su mantenimiento puede variar dependiendo del tipo de vegetación que se implementa. Los servicios que aportan los techos verdes incluyen la mitigación de los contaminantes del aire, atenuación de lluvias fuertes, reducción de consumo de energía al mejorar el desempeño térmico del edificio, mejora de la calidad del agua, ayuda a la mitigación del efecto de isla de calor, preservación ecológica, barrera contra sonido y otros más [6].

Se mencionan varias investigaciones donde analizan los efectos de los techos verdes, cada uno en diferentes ciudades, a excepción de una investigación llevada a cabo en Singapur donde, se registraron reducción en gases como SO_2 , NO_x , e incrementos en el PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, esto al deteriorar el flujo de aire horizontal, en los demás se observó una reducción general en los contaminantes por parte de los techos verdes. También se hace referencia a trabajos que encontraron que los efectos de los techos verdes dependían de la dirección del viento y que señalaban el efecto refrigerante que tienen sobre los vientos como característica que ayudó a la potenciar la dispersión y reducir las concentraciones en los cañones urbanos [6, 9]. Finalmente se indica que los efectos que demuestran los techos verdes dependen de la correcta implementación de estos, para lo cual se debe considerar la posición del techo verde, la dirección del viento, velocidad del viento, estación, condiciones climáticas, nivel de las concentraciones, la velocidad seca de deposición y especie de las plantas [6].

- Los muros verdes se pueden dividir principalmente en dos tipos; los muros vivientes y las fachadas verdes, son similares en el hecho de que ambas se establecen en superficies verticales, las cuales abundan en las ciudades. Pueden instalarse en cañones urbanos con poco espacio o suelos poco aptos

para la plantación de árboles o arbustos, gran variedad de plantas se puede implementar en este tipo de estructura verde, lo que las hace sistemas versátiles, son recomendadas como alternativas a los árboles que mejoran la calidad del aire sin interrumpir el intercambio de aire al interior del cañón con los flujos que viajan sobre los edificios.

Su principal diferencia es que cuando se refieren a fachadas verdes el tipo de vegetación a utilizar son especies que tiene la capacidad para escalar y cubrir superficies, mientras que en los muros vivientes se encuentran una gran variedad de tipos de plantas que pueden ser instaladas en muros con ayuda de paneles y estructuras que permiten su desarrollo en superficies verticales. Además de esto las fachadas verdes son fáciles de instalar y requieren poco mantenimiento, por el contrario, las paredes vivas son más complicadas de instalar y plantar y requiere bastante mantenimiento.

De acuerdo con la búsqueda realizada, pocos estudios han registrado que analicen la capacidad de los muros verdes para reducir los contaminantes, sin embargo, de acuerdo a dos de los estudios que revisaron encontraron a través del uso de modelos que los muros verdes presentan mayor efectividad para la remoción de PM que para gases. Uno de los estudios, realizado en 2007 encontró una tasa de remoción de PM₁₀ de 1.37 mg/año en 1216 hectáreas de zona urbana de Toronto.

Otro de estos estudios, realizado en UK, encontró que los muros vivos presentan una correlación inversa entre el tamaño de la partícula y la cantidad de PM captura, capturando más partículas finas que gruesas. Adicionalmente un estudio realizado en el 2018, que evaluó la reducción del PM generado por el tráfico, por 20 especies vegetales utilizadas en muros vivientes, encontró que en promedio para todas las especies se capturo $122.08 \pm 6.9 \times 10^7$ partículas de PM₁, $8.24 \pm 0.72 \times 10^7$ de PM_{2.5} y $4.45 \pm 0.33 \times 10^7$ de PM₁₀ en 100 cm² de muro vivo. Varios estudios indicaron a la especie Hedera hélix como una planta con grandes capacidades para la captura y retención de PM incluso tras experimentar eventos de lluvia.

Al igual que los demás tipos de estructuras verdes el desempeño de los muros verdes depende de las características del lugar donde se instalen, como la dirección del viento, las especies a utilizar, índice de área foliar y humedad. Si todos estos aspectos son considerados y el muro verde es implementado de acuerdo a estos correctamente se pueden lograr grandes reducciones de PM instalándolos en áreas urbanas densas sin restringir o interrumpir los flujos de aire [6].

- Se ha hablado de las pantallas verdes como otra estructura verde alternativa para la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos, estas consisten en la instalación de una malla de metal o plástico en la cual se vegetación con la capacidad de escalar crece, los beneficios que se consideran con su instalación, es la captura de contaminantes, apoyar la biodiversidad, reducción del sonido y atenuación de la lluvia, pueden plantarse en lugares donde el espacio para hacerlo es escaso, es una opción barata y fácil de instalar y requiere muy poco mantenimiento. Al igual que los muros verdes se han registrado pocos estudios sobre la capacidad de las pantallas verdes para reducir los contaminantes en el aire y ninguno realizado en cañones urbanos.

Un estudio realizado en UK en 2015 evaluando el PM capturado por pantallas verdes de Hedera hélix en una congestionada calle de Birmingham, determinó que estas presentaron un buen desempeño en la captura y reducción de PM, en el estudio se encontró que en algunos lugares donde se llevaba a cabo la investigación las pantallas lograron reducir entre un 40 - 60 % del PM. En la revisión realizada para la investigación de las estructuras verdes se concluye con respecto a esta alternativa, que aún es necesaria mucha investigación sobre la efectividad que puede tener este tipo de estructura verde [6].

Como se mencionó anteriormente, los estudios sobre estas estructuras verdes alternativas a los árboles y arbustos son escasos, de hecho, de los trabajos consultados sólo [6] que se enfoca específicamente en este tema los consideró. esto sugiere falta de estudios sobre estas otras estructuras verdes explorando su desempeño en más locaciones y bajo diferentes ambientes, explorar sus límites de aplicación y el efecto que puedan tener combinadas. Aun así, hasta el momento parecen ser alternativas muy viables que se deben explorar.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta un análisis de los aspectos más relevantes relacionados con el efecto de la vegetación ubicada en cañones urbanos sobre el PM, con la intención de entender este efecto y recolectar diferentes opiniones y conclusiones al respecto, buscando producir un documento útil e informativo que permita dar a conocer el fenómeno, se entienda los componentes que en él interactúan y los aspectos mínimos a tener en cuenta cuando se planifiquen intervenciones urbanas en zonas de altos niveles de contaminación atmosférica por PM. Finalmente, se presenta un conjunto de recomendaciones generales que se deben considerar para la implementación de cualquier sistema pasivo que use la vegetación para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas:

- La relación entre la vegetación y el PM en cañones urbanos es compleja e involucra factores externos adicionales a la vegetación y el PM, la interacción se encuentra sujeta a muchos otros factores como: el tamaño y forma de la partícula, tipo de estructura verde, el nivel de concentración, su distancia con respecto a la fuente, la velocidad del viento en el cañón urbano, la dirección con la que ingresa el viento al cañón urbano, características macro y micro morfológicas de la especie vegetal, el cómo se encuentra ubicada la vegetación dentro del cañón urbano, la relación de aspecto del cañón urbano, las características de forma del cañón urbano (densidad urbana, altura promedio, y grado de curvatura), las condiciones climáticas específicas del lugar y el momento, entre otros.
- Es necesario hacer un estudio previo de todos los factores que intervienen en la relación, para intentar hacer una correcta implementación de la vegetación con el objetivo de mitigar el PM, de no hacerlo, e implementar la vegetación de manera incorrecta, puede conllevar a la reducción de la ventilación del lugar y al incremento de las concentraciones de los contaminantes.
- Se entiende que la vegetación solo hasta hace poco ha sido estudiada como una herramienta para el control de la contaminación del PM.
- Hasta el momento, su estudio está sesgado en lo que se refiere al tipo de vegetación a evaluar, pues la mayoría de los trabajos consideran solo árboles en sus análisis, igualmente los trabajos desarrollados en cañones urbanos se notan escasos y son más frecuentes los estudios realizados en carreteras.
- Las características del cañón urbano y del viento juegan un papel mucho más importante que las características de la vegetación para determinar el efecto que tendrá la vegetación sobre el PM, es primordial tener una comprensión clara de estas características y su desarrollo de cada cañón urbano en el que se desee implementar la vegetación como herramienta de mitigación.
- Hace falta mayor investigación en este campo, sobre todo estudios que evalúen el desempeño de otros tipos de vegetación en diferentes escenarios.
- Hay una gran variedad de técnicas para la evaluación de la relación, siendo los modelos herramientas de gran ayuda e importancia, y aunque se han encontrado patrones como que los modelos más utilizados son de tipo numérico con mayor número de estudios que usan técnicas de CFD y experimentos por medio de túneles de viento. Esta gran variedad de métodos también refleja una carencia de protocolo, y tal como se mencionaba en [6] esto dificulta la comparación de resultados y eficiencias de los procesos. Adicionalmente, es otro factor que sugiere que el campo de investigación se encuentra en una etapa temprana.
- Se confirma que la vegetación tiene la capacidad de capturar no solo grandes cantidades de PM sino también de otros contaminantes a través de sus hojas, tal que, hojas con características más rugosas, que exhiban la presencia de tricomas y formas que amortigüen la agitación provocada por vientos fuertes potencian la captura de los contaminantes. Contrariamente, hojas que presentan características tales como capas de cera gruesa, lisas y sin muchos pliegues dificultan la retención de los contaminantes, pero facilitan su lavado o re-suspensión, por lo que es determinante que aspecto se desea priorizar y determinar la viabilidad del proyecto en el espacio que se desee realizar.

- El lavado es un fenómeno que debe ser estudiado a mayor profundidad, ya que renueva la funcionalidad de las hojas para capturar más PM al liberarlas del que las ocupa y puede dar un cierre favorable al ciclo del PM generado en las ciudades y capturado por la vegetación si las condiciones adecuadas se presentan.

REFERENCIAS

- [1] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia. "Contaminación Atmosférica y sus Efectos Sobre la Salud de los Habitantes del Valle de Aburrá 2008 – 2017, Análisis de la Exposición de Corto y Largo Plazo". 2nd ed. dic. 2019.
- [2] D. Aguiar, L. M. Gomez, T. Alvaréz, M. A. Correa y J. C. Saldarriaga, "Evaluating the impact of PM2.5 atmospheric pollution on population mortality in an urbanized valley in the American tropics", *Atmospheric Environment*, Vol. 224, p. 117343, feb. 2020.
- [3] K. Ki-Hyun, K. Ehsanul y K. Shamin, "A review on the human health impact of airborne particulate matter", *Environment International*, Vol. 74, p. 136-143, oct. 2014.
- [4] B. Kończak, M. Cempa, Ł. Pierzchała y M. Deska, "Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air", *Environmental Pollution*, Vol. 268, p. 115465, ago. 2020.
- [5] V. Viippola, T. H. Whitlow, W. Zhao, V. Yli-pelkonen, J. Mikola, R. Pouyat, H. Setälä, "The effect of trees on air pollutant levels in peri-urban near-road environments", *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 30, p. 62-71, 2018.
- [6] M. Tomson, P. Kumar, Y. Barwise, P. Perez, H. Forehead, K. French, L. Morawska, J. Watts y J. F. Watts, "Green infrastructure for air quality improvement in street canyons", *Environment Internat.*, Vol. 146, p. 106288, 2020.
- [7] A. Wania, M. Bruse, N. Blond y C. Weber, "Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations", *Journal of Environmental Management*, Vol. 94 p. 91-101. 2011.
- [8] D. Han, H. Shen, W. Duan y L. Chen, "A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales", *Urban Forestry & Urban greening*, Vol. 48, p. 126565, dic. 2020.
- [9] M. Moradpour, H. Afshin y B. Farhanieh, "A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree planting", *Atmospheric Pollution Research*, Vol 8, p. 253–266, sep. 2016.
- [10] L. Wang, H. Gong, W. Liao y Z. Wang, "Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion", *Science of the Total Environment*, Vol. 532, P.420–434, mayo 2015.
- [11] R. Buccolieri, C. Gromke, S. Di Sabatino y B. Ruck, "Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons", *Science of the Total Environment*, Vol. 407, p. 5247-5256, julio 2009.
- [12] S. Janhäll, "Review on urban vegetation and particle air pollution: Deposition and dispersion", *Atmospheric Environment*, Vol. 105, p. 130-137, ene. 2015.
- [13] E. Krüger y M. Suga, "Recommendations of height restrictions for urban canyons in Curitiba Brazil", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol 8-issue 2, p. 447-452, oct. 2018.
- [14] R. Buccolieri, S. M. Salim, L. S. Leo, S. Di Sabatino, A. Chan, P. Lelpe, G. Gennaro, y C. Gromke, "Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction", *Atmospheric Environment*, Vol. 45, p. 1702-1713, ene. 2011.
- [15] J. Mori, A. Fini, M. Galimberti, M. Ginestro, G. Burchi, D. Massa y F. Ferrini, "Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density", *Science of the Total Environment*, Vol. 643, p. 725-737, junio 2018.
- [16] R. Baldauf, "Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 52, p. 354-361, marzo 2017.
- [17] X. Xu, J. Xia, Y. Gaob y W. Zheng, "Additional focus on particulate matter wash-off events from leaves is required: A review of studies of urban plants used to reduce airborne particulate matter pollution", *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 48, p. 126559, Dec. 2019.
- [18] A. Przybysz, A. Sæbø, H. M. Hanslin y S. W. Gawroński, "Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level: rainfall and the passage of time", *Science of the Total Environment*, Vol. 481, p. 360-369, marzo 2014.
- [19] C. Gromke, R. Buccolieri, S. Di Sabatino y B. Ruck, "Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data", *Atmospheric Environment*. Vol. 42, p. 8640-8650, marzo 2008.
- [20] J. Yanga, B. Shia, Y. Shia, S. Marvin, Y. Zhenga y G. Xia, "Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form", *Sustain. Cities and Society*, Vol. 54, p. 101941. 2019.
- [21] R. Salas, M. J. Perez-Villadoniga, J. Prieto-Rodríguez y A. Russo, "Were traffic restrictions in Madrid effective at reducing NO2 levels?", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 91, p. 102689, feb. 2021.
- [22] L. M. Gómez Peláez, J. M. Santos, T. Toledo de Almeida Albuquerque, N. Costa Reis Jr, W. Lemker Andreão y M. de Fátima Andrade, "Air quality status and trends over large cities in South America", *Environmental Science & Policy*, Vol. 114, p. 422-435, dic. 2020.

Modelación ecológica integrada para el apoyo en la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico. Un Caso de estudio

Stephanie Lugo Rodríguez¹

Javier E. Holguín González²

Oscar Ascuntar-Osnas³

^{1,2}Universidad Autónoma de Occidente

³Universidad del Valle

Colombia

El estado ecológico de un río depende de características como las concentraciones de parámetros fisicoquímicos, las hidromorfológicas, el régimen hidrológico y los procesos biológicos que ocurren en las aguas superficiales. La modelación matemática permite hacer una representación a partir de esa información y ofrecer una idea de lo que está sucediendo en el sistema, por lo que se constituye en una herramienta útil para la planeación de estrategias que intervienen en pro de mejorar la calidad del agua de los ríos. No obstante, la mayoría de los marcos de modelación tradicionales en ríos tienden a representar procesos individuales e independientes para cada condición. Por lo tanto, es necesario buscar estrategias de modelación que permitan evaluar simultáneamente el impacto de las presiones hidromorfológicas y la contaminación fisicoquímica en la calidad ecológica del agua de los ríos. En este estudio se emplea un Marco de Modelación Ecológica Integrada MMEI para evaluar la degradación ecológica de los ríos y generada por la contaminación fisicoquímica y las perturbaciones hidromorfológicas. Este enfoque integra un modelo matemático hidráulico y fisicoquímico de la calidad del agua con modelos ecológicos acuáticos. El MMEI está *integrado* en el sentido de que la salida de los modelos de cantidad y calidad del agua son la información de entrada para los modelos ecológicos. Se desarrollaron dos tipos de modelos ecológicos: 1) de idoneidad del hábitat, para predecir la presencia de macroinvertebrados, y 2) de evaluación ecológica, para predecir la clasificación y la puntuación de varios índices bióticos. En este capítulo se presenta la aplicación del MMEI en el caso de estudio del río de montaña Bitaco, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, en una evaluación de tres escenarios de definición de caudal ambiental.

¹ Ingeniera Ambiental. Joven investigadora.

Contacto: steluro1192@gmail.com

² Ingeniero Sanitario, Especialista en el tema de gestión integral del recurso hídrico y del uso de la simulación matemática como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en la gestión ambiental.

Contacto: jeholguin@uao.edu.co

³ Biólogo y Magíster en Ciencias.

Contacto: askuntar.osnas@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La modelación es entendida como un proceso de obtención de una representación matemática a partir de un problema o fenómeno del mundo real [1]. Estos modelos permiten predecir la evolución de un sistema en su conjunto a corto, mediano o largo plazo ante una acción determinada, es decir la evolución de un contaminante vertido en un sistema, cuál será la evolución de su concentración con el espacio-tiempo y como puede interferir con el resto de sustancias presentes en el agua [1]. Es así, que la aplicación de estas herramientas en sistemas acuáticos ha permitido representar las condiciones ambientales y simular su respuesta ante estímulos o impactos determinados en el agua. Este tipo de herramientas son útiles porque ayudan al usuario de estos modelos a tomar decisiones relacionadas con el sistema real sin tener que tratar con toda su complejidad.

En los sistemas fluviales, la calidad fisicoquímica y ecológica son dos aspectos relevantes que dependen de características, como, por ejemplo, el régimen hidrológico, las concentraciones de parámetros químicos y el transporte de los mismos y los procesos biológicos que ocurren en las aguas superficiales [2]. La modelación de estas características ha permitido una adecuada gestión integrada del recurso hídrico, que incluye la planeación de estrategias que intervienen para mejorar la calidad del agua de los ríos. No obstante, la mayoría de los marcos de modelación tradicionales tienden a representar procesos individuales y funcionar de forma independiente para cada condición [3].

Así, se requiere la integración de los modelos para realizar evaluaciones exhaustivas que serían imposibles cuando se analiza cada componente individual del sistema por separado. Estas metodologías que integran todos los componentes se conocen como estrategias holísticas debido a que permiten el uso de modelos para simular las condiciones hidráulicas, fisicoquímicas y ecológicas de los ríos, siendo esto un aspecto clave en la gestión integrada del recurso hídrico. Por lo anterior, es necesario buscar modelos que permitan evaluar simultáneamente el impacto de las presiones hidromorfológicas y la contaminación fisicoquímica en la calidad ecológica del agua de un río.

En este sentido, metodologías como el Marco de Modelación Ecológica Integrada MMEI [4] permite considerar simultáneamente el impacto de diferentes presiones fluviales, como la descarga de aguas residuales que afectan el estado fisicoquímico y la degradación del hábitat causada por cambios en las condiciones hidromorfológicas sobre la calidad ecológica del agua. El MMEI tiene tres componentes básicos de modelación: 1) un modelo de cantidad de agua del río, 2) un modelo de calidad físico-química del agua del río, y 3) un modelo ecológico del río. El MMEI está *integrado* en el sentido de que la salida de los modelos de cantidad y calidad de agua son la información de entrada para los modelos ecológicos. Como conclusión, en el MMEI se calculan relaciones directas entre un conjunto de variables predictoras (físico-químicas e hidráulicas) y variables de respuesta ecológica (por ejemplo, presencia y ausencia de una taxa de macroinvertebrados o el valor de un índice biológico) [4].

Una vez realizada la integración de los modelos, éstos pueden utilizarse para predecir la calidad ecológica del agua teniendo en cuenta diferentes escenarios de simulación de la gestión de los ríos. Así, el MMEI permite considerar el impacto de fuerzas motrices en la calidad ecológica del agua, asociadas al deterioro fisicoquímico del agua por la descarga de sistemas de alcantarillado, la sobrecarga o el cierre de las plantas de tratamiento de aguas residuales, o la optimización de estas. De forma complementaria el MMEI permite evaluar las afectaciones hidromorfológicas en la calidad ecológica de los ríos, debidas a las variaciones de caudales por efluentes de embalses o presas; las disminuciones de caudales en los ríos debido a concesiones; o realizar estudios de caudal ambiental [4].

El objetivo de este trabajo fue implementar la metodología MMEI en un río de montaña (río Bitaco) en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Inicialmente se realizó un análisis de la información disponible (hidráulica, fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológica). A partir de esa información se realizó un procesamiento de una base de datos para la construcción de los modelos ecológicos. Este último componente incluyó la implementación de modelos de ocurrencia para grupos de macroinvertebrados seleccionados y modelos de evaluación ecológica basados en índices bióticos de macroinvertebrados a través de la aplicación de estadísticas multivariadas basadas en Modelos Lineales Generalizados (MLG) y las

técnicas de minería de datos y de aprendizaje automático. Se planteó implementar modelos de Regresión Logística y Árboles de Decisión (Árboles de Clasificación y Árboles Tipo Modelo) y se realizó la integración de esos modelos con el modelo hidráulico y fisicoquímico de calidad del agua QUAL2Kw [5].

2. MÉTODO

2.1 Área de estudio

El río Bitaco nace en la Zona de Reserva Forestal Protectora Regional del río Bitaco en la cordillera occidental del departamento del Valle del Cauca y hace parte de la cuenca hidrográfica de Dagua la cual finalmente drena a la vertiente del Océano Pacífico. En la subcuenca del río Bitaco se encuentran ubicados los municipios de La Cumbre, Restrepo, Dagua, Calima, El Darién, Vijes y Yotoco que hacen parte del departamento del Valle del Cauca [6]. La subcuenca del río Bitaco es de 534.5 km² que corresponden aproximadamente al 37% de la cuenca del río Dagua. El río Bitaco tiene una longitud de 42 km, un caudal medio de 3.8 m³/s, una velocidad media de 1 m/s, una profundidad de 0.4m y un ancho promedio de 11m. A su vez, se tuvieron en cuenta dos tributarios priorizados que son el río Pavas y el sistema quebrada Aguamona- río Grande, que corresponden a los dos principales afluentes de la subcuenca del río Bitaco. El río Pavas tiene una longitud promedio de 12 km y el sistema quebrada Aguamona- río Grande de 40 km [6] (Figura 1).

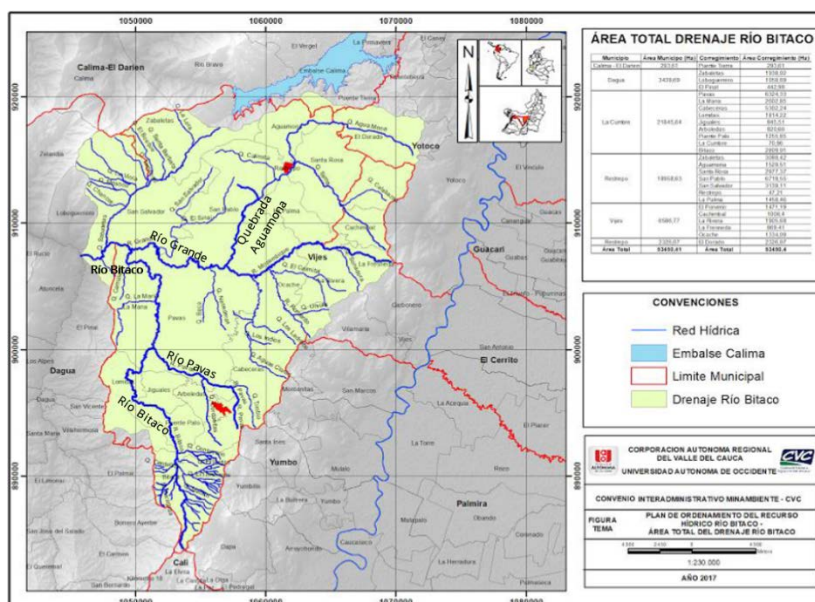


Figura 1. Descripción general del área de estudio: Subcuenca hidrográfica del río Bitaco en el departamento del Valle del Cauca, Colombia [6]

Los principales usos en la subcuenca del río Bitaco y en sus tributarios priorizados son consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, pesca y acuicultura. Existen dos acueductos urbanos correspondientes a la cabecera municipal de Restrepo que capta las aguas del sistema Quebrada Aguamona-río Grande y a La Cumbre que se abastece del río Bitaco [6]. Sin embargo, al desarrollar dichas actividades se generan aguas residuales las cuales son vertidas en las fuentes hídricas mencionadas. Es así como el río Pavas recibe los vertimientos sin tratamiento de los centros poblados de Pavas y La Cumbre, el río Bitaco recibe el vertimiento sin tratamiento del centro poblado de Bitaco y el sistema Quebrada Aguamona-río Grande recibe los vertimientos de un barrio importante del municipio de Restrepo llamado La Independencia y también de la cabecera municipal, la cual es previamente tratada en una Planta de tratamiento de Aguas Residuales de nivel primario [6].

Asimismo, en la zona de estudio, se presentan descargas difusas no controladas provenientes de las actividades agrícolas y pecuarias [6]. Estos vertimientos de aguas residuales provocan un creciente deterioro de la calidad del agua del río Bitaco y sus principales tributarios y pueden llegar a afectar a la salud humana y a la vida acuática, al limitar los usos del agua, al afectar a la ecología de los ríos y a provocar la pérdida de su atractivo.

2.2 Recopilación de información disponible, preprocesamiento y procesamiento de la base de datos

- *Recopilación de información disponible:* la información disponible utilizada en esta investigación fue resultado del Proyecto PORH del río Bitaco recolectada durante el año 2017. Se contó con información detallada de la subcuenca, en 24 estaciones de monitoreo durante dos campañas de muestreo, con 56 datos de parámetros hidráulicos, fisicoquímicos y microbiológicos, 48 datos de perifiton, 48 datos de macroinvertebrados y 18 datos de peces [6].
- *Preprocesamiento de la base de datos:* se realizó un preprocesamiento de la información disponible para la construcción de los modelos ecológicos.
- *Preprocesamiento de las variables predictoras:* Consistió en realizar un análisis de exploración de datos, para eliminar datos o variables considerando los siguientes aspectos: variables fisicoquímicas con valores iguales en la mayoría de las estaciones al límite de detección del laboratorio, variables solo medidas en algunas estaciones y posibles valores atípicos (Outliers). Asimismo, para permitir el acoplamiento de los modelos ecológicos desarrollados con el modelo de calidad del agua QUAL2Kw, se tuvieron en cuenta exclusivamente las variables modeladas por dicho software que pudieron ser monitoreadas en este Proyecto. Dichas variables incluyen las hidráulicas, tales como la profundidad promedio del agua, velocidad promedio del agua y caudal; y las variables fisicoquímicas tales como los Sólidos Suspendidos Totales SST, Oxígeno disuelto OD, DBO Carbonácea rápida DBOfast, DBO Carbonácea lenta DBOslow, Nitrógeno orgánico Norg, Nitrógeno Amoniacal NH₄, Nitrógeno Total Kehjda NTK, Nitrógeno Total NT, Nitratos NO₃, Fósforo orgánico PO, Fósforo inorgánico SRP, Fósforo Total PT, Fitoplancton, Detritus MOP, Alcalinidad, Patógenos, pH, Carbono Orgánico Total. Para determinar posibles valores atípicos (Outliers), se utilizaron las herramientas gráficas de diagrama de cajas y alambres (Box Plots) y Cleveland Dot Plots.
- *Preprocesamiento de las variables respuesta:* se tuvieron en cuenta dos tipos de variables de respuesta ecológica a partir de la información recolectada de macroinvertebrados en la zona de estudio.
- *Ordenes de macroinvertebrados:* se tuvieron en cuenta como binomiales o dicotómicas (presente o ausente). Se utilizaron los órdenes y familias de macroinvertebrados reconocidas por tener baja tolerancia a la contaminación con puntuación de 8 a 10 y alta tolerancia a la contaminación con puntuación de 1 a 3 según las referencias del índice ambiental BMWP-UNIVALLE [7]. Una vez identificadas las familias presentes, se procedió a depurar aquellos órdenes que pudieran causar ambigüedad en los resultados debido a que representaban ambos estados de la calidad del agua, además aquellos que solo estuvieran presentes en una campaña de monitoreo y también los que tuvieran muy poca cantidad de individuos presentes. Adicionalmente, se unificaron las familias que tuvieran el mismo orden.
- *Índices bióticos:* Se tuvieron en cuenta como variables nominales (clase del índice biótico) y numéricas (valor del índice biótico). Para la selección del índice biótico como variable respuesta de los modelos ecológicos se contemplaron las siguientes consideraciones: 1) la información disponible de los índices calculados en el PORH Bitaco, 2) las variables tenidas en cuenta para los cálculos de los mismos, 3) los rangos de clasificación del índice para la calidad ecológica de agua, 4) la aplicación de estos índices en el contexto colombiano, y 5) la distribución de los rangos de clasificación en los datos observados. Para las variables nominales y numéricas se tuvieron en cuenta las clases y los valores del índice biótico BWMP-UNIVALLE [7], el Índice de Calidad Ecológico ICE [8] y el Índice de Integridad Biótica utilizando invertebrados acuáticos IBIAP [9].

El índice BMWP-UNIVALLE fue adaptado para Colombia por la Universidad del Valle a condiciones regionales del sur occidente colombiano [7]. Este índice aplica puntajes asignados para las diferentes familias de macroinvertebrados presentes en cada una de las estaciones de muestreo. El nivel de identificación taxonómica a emplear es de Familia y según esta, se le asigna un puntaje de uno a diez (1-10) de acuerdo con su sensibilidad a la contaminación orgánica. El significado ambiental es representado por los valores de este índice, donde los valores altos corresponden a lugares con ambientes óptimos

para el desarrollo de grupos biológicos con alta sensibilidad a la contaminación hídrica [7]. El resultado final del índice BMWP es un valor entero. Una calidad ecológica del agua muy limpia tiene un valor $BMWP > 120$, un agua no contaminada tiene un valor entre 101 y 120, un agua levemente contaminada tiene un valor entre 61 y 100, un agua contaminada tiene un valor entre 36 y 60, un agua muy contaminada tiene un valor entre 16 y 35 y una fuertemente contaminada tiene un valor inferior a 15 [7].

El índice de Calidad Ecológica ICE, permite establecer cuantitativamente para los géneros valores de tolerancia ante condiciones adversas; estos valores son identificados de acuerdo con el análisis integrado de las variables ambientales locales junto con la composición y abundancia de los organismos, igualmente considera el nivel de dependencia de la abundancia con respecto a variables ambientales y no se condiciona a un sistema ni a un grupo de organismos [8]. Este índice es formulado con base en análisis multivariados. En él se propone un método para la elaboración de un sistema de bioindicación en el que la calidad ecológica se establece mediante: 1) un gradiente ambiental establecido a través de un análisis de correspondencia; 2) la identificación para cada taxón, de rangos de tolerancia y valores óptimos en función de ese gradiente ambiental; y 3) las ponderaciones de calidad para cada estación [8]. El método de cálculo usado no está restringido a un sistema particular ni a un grupo de organismos específicos.

El Índice de Integridad Biótica utilizando invertebrados acuáticos (IIBIAP) [9] determina el estado ambiental o el grado de impacto ambiental en un cuerpo de agua a partir de la capacidad de un sistema de soportar y mantener una comunidad de macroinvertebrados balanceada e integrada, reflejado en comunidades acuáticas que tienen una alta proporción de fauna compuesta por formas ambientalmente sensibles y especializadas en su función, sin un grupo dominante a expensas de una comunidad balanceada, integrada y adaptada a las condiciones regionales [9]. Este índice implica la medida de la riqueza de las comunidades (número total de taxones presentes en un sitio), la presencia de taxones sensibles a la contaminación (índice Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera EPT), número de taxones dentro de los gremios tróficos (filtradores y desmenuzadores) y la tolerancia media de la muestra (usando los valores de tolerancia adaptados para el suroccidente colombiano). El resultado final del índice IIBIAP es un valor entero entre 0 y 16. Una calidad ecológica del agua alta tiene un valor IIBIAP de 16, una buena calidad tiene un valor entre 12 y 15, una calidad moderada tiene un valor entre 6 y 12 y una mala calidad del agua tiene un valor inferior a 6 [9].

- *Procesamiento de la base de datos:* Finalizando el pre-procesamiento, se realizó un análisis de colinealidad (o correlación) entre variables predictoras (información hidráulica, fisicoquímica y microbiológica) y la relación entre las variables respuesta (información hidrobiológica).

Para revisar la colinealidad entre las variables predictoras, se utilizó un procedimiento basado en un Análisis de Componentes Principales ACP con una rotación varimax y se evaluó el rango de Spearman S como coeficiente de correlación. La rotación varimax en el ACP permitió maximizar la independencia de los Componentes Principales CP. Para explorar la correlación entre las posibles variables predictoras utilizadas para construir los modelos, se utilizó el coeficiente de correlación Spearman en vez del coeficiente de correlación de Pearson porque el coeficiente de correlación Spearman no hace supuestos sobre la linealidad en la relación entre las variables y permite explorar la correlación entre las potenciales variables predictoras basándose en el ACP y en análisis de correlación [10].

Por lo tanto, por medio del ACP y el análisis de correlación, todas las variables predictoras fueron evaluadas para reconstruir una base de datos más sintetizada que se utilizó para desarrollar los modelos ecológicos. El coeficiente de correlación Spearman es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos. Con el coeficiente de correlación de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables aleatorias [11].

Con la base de datos con las variables predictoras y respuesta se procedió a la selección de los algoritmos o técnicas para los modelos ecológicos.

2.3 Implementación de los modelos

En este estudio se empleó un marco conceptual de análisis recientemente ajustado para evaluar la degradación ecológica de los ríos y arroyos generada por la contaminación fisicoquímica y las perturbaciones hidromorfológicas llamado Marco de Modelación Ecológica Integrada-MMEI [4]. Este modelo permite considerar simultáneamente el impacto de diferentes presiones fluviales, como la descarga de aguas residuales que afectan el estado fisicoquímico y la degradación del hábitat causada por cambios en las condiciones hidromorfológicas sobre la calidad ecológica del agua. En esta investigación se adaptó el MMEI propuesto para 2 componentes básicos (Figura 2): 1) en el primer componente un modelo de cantidad y de calidad del agua del río, y 2) en el segundo componente dos modelos ecológicos, el primero un modelo para la ocurrencia de grupos de macroinvertebrados seleccionados y el segundo un modelo de evaluación ecológica basado en índices bióticos de macroinvertebrados.

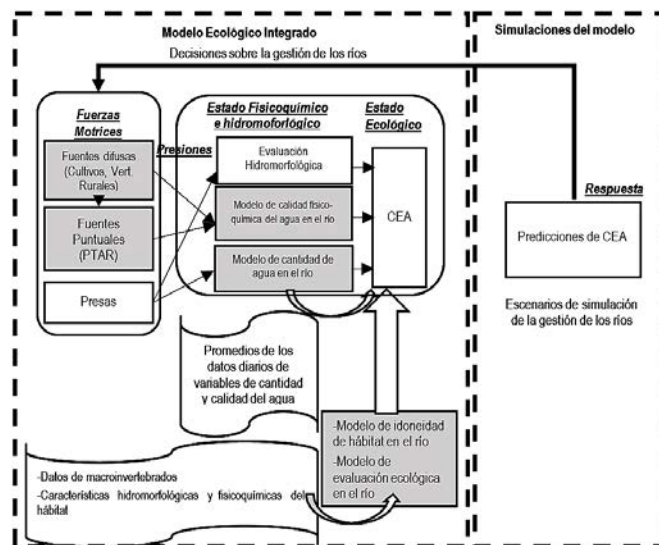


Figura 2. Diagrama de Flujo para la Selección de Modelos Ecológicos implementados en el Marco Integrado de Modelado Ecológico IEMF. Los elementos conceptuales considerados en el MMEI se presentan en cursiva, es decir, fuerzas motrices, presiones, estado físico-químico, hidromorfológico y ecológico y respuesta. Los cinco componentes básicos de la modelación se encuentran en recuadros grises. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR, Calidad Ecológica del agua CEA

Para el primer componente se usó el modelo hidráulico y de calidad del agua QUAL2Kw. Para el segundo componente se emplearon las recomendaciones de un flujograma para la selección de modelos de evaluación ecológica de macroinvertebrados acuáticos [12] (Figura 3), el cual considera las características de los datos ecológicos, su tipo de distribución estadística y las cantidades de datos disponibles.

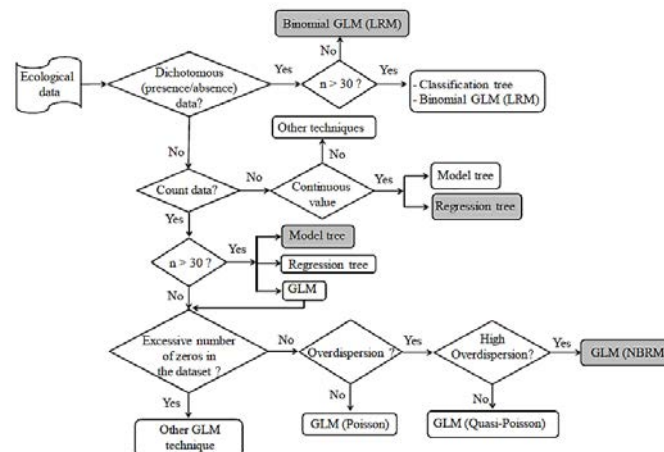


Figura 3. Diagrama de Flujo para la Selección de Modelos Ecológicos implementados en el Marco Integrado de Modelado Ecológico IEMF [12]. Modelos de regresión logística LRM, Modelos de regresión binomial negativa NBRM, Modelo lineal generalizado GLM; Número de muestras en el conjunto de datos con mediciones simultáneas de fisicoquímico información hidráulica/Hidromorfológica y biológica n

2.3.1 Modelo hidráulico y de calidad fisicoquímica del agua

Para realizar la modelación hidráulica y de calidad del agua en el río Bitaco y sus principales tributarios se implementaron dos versiones del modelo QUAL2K [5, 13, 14]. El modelo QUAL2K es un software de modelación de calidad de agua para ríos que se identifica por ser de uso libre, desarrollado bajo una aplicación de Visual Basic que trabaja bajo Excel. El modelo QUAL2K es una versión mejorada del modelo QUAL2E (o Q2E) [13]. El modelo incorpora parámetros de calidad de agua, parámetros hidráulicos, datos de elevación, ubicación geográfica, meteorología y procesos de reaireación. El modelo QUAL2Kw es una versión mejorada del QUAL2K [5]. Adicionalmente, este modelo presenta una aplicación que permite realizar una calibración objetiva, mediante la auto calibración del modelo usando la técnica de algoritmos genéticos [5].

El modelo realiza un balance hidrológico en términos del caudal, un balance térmico en términos de la temperatura y un balance de masa en términos de concentración de cada parámetro fisicoquímico. En estos elementos puede haber ganancia o pérdida de masa debido a procesos de transporte, fuentes externas o por fuentes internas y sumideros. El modelo está programado en el lenguaje macro de Windows: Visual Basic para Aplicaciones (VBA) y utiliza Excel como interfaz gráfica para usuario [14]. El modelo asume que la corriente está bien mezclada en sentido vertical y en la sección de la corriente y que los principales mecanismos de transporte, advección y dispersión de materiales son significativos solamente en la dirección principal del flujo, es decir, longitudinal al canal o corriente [14].

Para resolver las ecuaciones de transporte de masa y reacción el programa utiliza la solución de diferencias finitas. Es decir que divide al río en un número específico de elementos computacionales y para cada elemento realiza: un balance hidrológico en términos del flujo; un balance de energía en términos de temperatura; y un balance de materia en términos de la concentración de los parámetros relevantes (DBO, OD, nitrógeno, fósforo, coliformes fecales, etc.) [14].

Los tramos de las corrientes modeladas se dividen en una red de *cabeceras* (fronteras aguas arriba) y subtramos. En el momento de seleccionar los subtramos se debe tener en cuenta que las propiedades físicas e hidráulicas (sección transversal, pendiente de la corriente, rugosidad etc.), químicas y biológicas permanecen constantes a lo largo de cada subtramo [14].

El modelo de simulación de calidad y cantidad del agua para el río Bitaco se implementó en el QUAL2Kw en la versión 6.0 [14]. Se modeló cada corriente de manera independiente (los tributarios principales río Pavas y quebrada Aguamona). Después los resultados se integraron al ramal principal en la versión 5.0 de este mismo modelo. Esta versión permite simular sistemas hídricos dendríticos, es decir, aquellos en los que la simulación se extiende no sólo a la corriente principal, sino también a sus afluentes o tributarios [13]. El modelo es capaz de simular un (1) cauce principal y tres (3) afluentes [13]. Los afluentes pueden funcionar de forma independiente o integrados en la rama principal en función de las necesidades del usuario [13].

En esta investigación el río Bitaco fue considerado como el brazo principal (longitud de 40.34 km) y los ríos afluentes: Pavas (longitud de 9,35 km) y el sistema Quebrada Aguamona-río Grande (longitud de 28,09 km). El resultado del último elemento computacional del río afluente se consideró como una entrada (es decir, una fuente puntual) para la corriente principal. La longitud de los ríos se dividió en 6 (río Bitaco), 4 (río Pavas) y 4 (sistema Quebrada Aguamona-río Grande) elementos con una longitud diferente en cada uno de ellos [6]. La Figura 4 muestra la segmentación y la posición de las principales descargas a lo largo de estos ríos.

Para la calibración y validación del QUAL2Kw se utilizaron datos recogidos en las campañas de monitoreo realizadas entre el 23 y 25 de agosto y 20 y 22 de septiembre de 2017 [6]. Se seleccionó el periodo de septiembre de 2017 como información para la calibración por considerarse un evento representativo de una época seca o de caudales bajos. Se consideraron las cargas contaminantes monitoreadas de 5 vertimientos domésticos realizados en las fuentes hídricas mencionadas. Los vertimientos no monitoreados se tomaron como fuentes distribuidas que corresponden a: cargas de origen doméstico, actividades pecuarias, tales como porcícolas y ganaderas, actividades como lavadero de carros y trapiches, y beneficiaderos de café, las cuales fueron tomadas de información histórica y de cálculos según la información de usuarios disponibles.

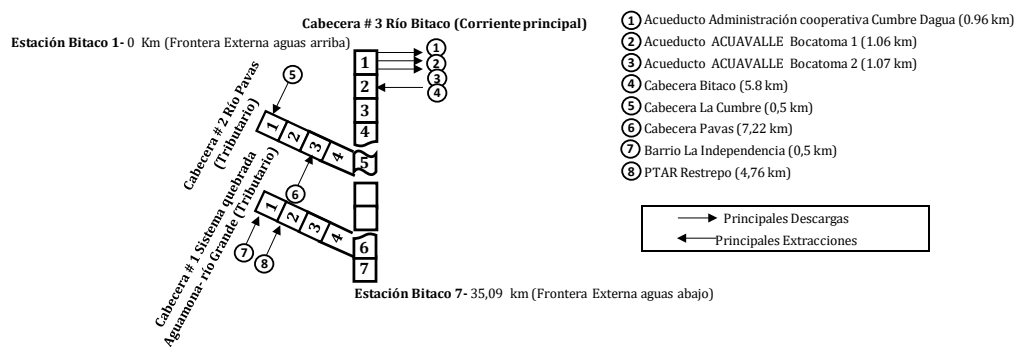


Figura 4. Segmentación del sistema con la ubicación de las principales fuentes de contaminación a lo largo de los ríos Bitaco, Pavas y sistema Aguamona-río Grande [6]

Las campañas de monitoreo sobre las estaciones en las fuentes hídricas se realizaron siguiendo la masa de agua, de forma secuencial teniendo en cuenta el tiempo de viaje del agua a lo largo de los ríos [6]. Las variables más importantes modeladas por el QUAL2Kw fueron OD, temperatura, DBO₅, DQO, especies de Nitrogeno (Nitrogeno Total, Nitratos y Nitritos), especies de Fosforo (Fosforo Total, orgánico e inorgánico), Coliformes Fecales, caudal, profundidad y velocidad del agua [6].

De acuerdo con la estructuración del modelo y su aplicación al río Bitaco, se identificaron 11 constantes cinéticas, las cuales fueron más importantes durante el proceso de calibración. Los rangos de los parámetros de calibración que corresponden a las constantes cinéticas se obtuvieron de dos fuentes bibliográficas [14] y [15]. Se utilizó la opción de auto-calibración que tiene el modelo y se logró calibrar un modelo de simulación de la calidad del agua para condiciones hidrológicas de caudales bajos. Para la auto-calibración de los parámetros cinéticos el modelo utiliza un algoritmo genético y se empleó la función objetivo [15].

Esta función permite la maximización del error medio cuadrático (RMSE). Para calibrar las características hidráulicas del QUAL2Kw, se utilizó la Ecuación de Manning y las mediciones de caudal y de la geometría del río [6]. El proceso de validación se realizó utilizando la campaña de monitoreo de agosto de 2017, la cual se consideró como un evento representativo de una condición de transición o húmeda, sin modificar los parámetros calibrados.

2.3.2 Modelación ecológica

- *Modelos de ocurrencia para grupos de macroinvertebrados seleccionados.* La selección del modelo a implementar se realizó por medio de una revisión estadística de los datos disponibles, identificando tipo de variable respuesta (i.e. numérica o cualitativa), cantidad de datos disponibles, tipo de distribución estadística de los datos y el cálculo de estadísticas descriptivas. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones de un flujograma para la selección de modelos de evaluación ecológica de macroinvertebrados acuáticos [12] (Figura 3), el cual considera las características de los datos ecológicos, su tipo de distribución estadística y las cantidades de datos disponibles. Se analizó si los datos ecológicos para la selección del modelo predictivo cumplen con las siguientes características: 1) son dicotómicos (i.e. presencia o ausencia), 2) son números enteros, 3) la cantidad de datos es mayor de 30, y 4) los datos de presencia y ausencia poseen una cantidad excesiva de ausencias o viceversa. A partir de esas consideraciones y siguiendo el flujograma para la selección de modelos de evaluación ecológica con base a datos dicotómicos o de presencia y ausencia, se determinó que en esta actividad se implementarían las técnicas de modelación con estadísticas multivariadas basadas en Modelos Lineales Generalizados (MLG) mediante modelos de Regresión Logística y las técnicas de minería de datos y de aprendizaje automático basadas en Árboles de Decisión (Árboles de Clasificación y Árboles Tipo Modelo).
- *Regresión logística.* La Regresión Logística RL es el enfoque de modelación más utilizado de los MLG para predecir la probabilidad de aparición o distribución de especies [16-19]. Este método basado en datos es fácil de utilizar para el análisis de datos dicotómicos (presencia/ausencia) y se puede implementar en muchos de software. La RL estima la probabilidad de una variable de respuesta

(presencia/ ausencia) en función de un conjunto de variables ambientales explicativas (por ejemplo, OD, DBO₅). Basándose en los datos de presencia/ausencia, una curva de respuesta de una especie describe la probabilidad de que la especie esté presente, p , en función de las variables ambientales. La variable respuesta se transforma mediante la función de enlace logit, que transforma las probabilidades acotadas (entre 0 y 1) a valores no limitados [19, 20]. El modelo de regresión logística se expresa según las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$g(x) = \text{Logit}(p) = \ln \left[\frac{p_i}{1-p_i} \right] = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m \quad (1)$$

$$p = \frac{\exp(g(x))}{1+\exp(g(x))} = \frac{1}{1+\exp(-g(x))} \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{1+\exp(-(\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\dots+\beta_m X_m))} \quad (3)$$

Donde $g(x)$ es la combinación lineal de factores ambientales; p_i es la probabilidad de que una especie esté presente en una celda o la probabilidad de que una celda del hábitat sea adecuada para una especie; β_0 y $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$ son constantes de regresión y $X = (X_1, \dots, X_m)$ es un vector de m variables predictoras.

Se consideraron todas las variables hidráulicas y fisicoquímicas partiendo de la base de datos aleatoria con variables predictoras seleccionadas a partir del ACP mediante un proceso de selección de variables por pasos en un análisis de Regresión Logística Multivariable RLM implementado en el software estadístico XLSTAT versión 2021 [21]. El criterio para eliminación de variables se basó en consideraciones estadísticas utilizando la prueba de razón de verosimilitud con un nivel de significancia de $p_{\text{value}} > 0.05$. Los modelos se ajustaron mediante la maximización de la función de verosimilitud [22] utilizando el algoritmo de Newton-Raphson.

Para comprobar la solidez de los modelos, los modelos RLM construidos se validaron mediante una validación cruzada (3-fold cross-validation manual). Este procedimiento constó en separar la base de datos en 3 subconjuntos, 2 de los subconjuntos se utilizaron para entrenamiento (training) o calibración del modelo y el restante para validación o prueba. Este proceso se repitió 3 veces, con cada uno de las posibles combinaciones de los subconjuntos de datos usados para entrenar el modelo y para usarlos como prueba. Se realizó una corrida con la base de datos completa solo de entrenamiento con el objetivo de conocer si hay una relación directa entre los valores de las variables respuesta y los patrones de las variables predictoras.

- *Árboles de Decisión.* Este tipo de técnica de modelación no depende del tipo de distribución estadística de los datos (variables predictoras y variable respuesta) y por lo general son aplicables a conjuntos de datos mayores a 30 registros [12]. Para predecir la presencia o ausencia de los órdenes de macroinvertebrados se usó la técnica Árboles de Clasificación.

Los Árboles de Decisión son una de las técnicas de aprendizaje automático más utilizadas en la modelación ecológica [23]. La idea básica de la generación de modelos de Árboles de Decisión es desarrollar modelos simples y transparentes que sean fáciles de usar e interpretar. Los modelos de Árboles de Decisión, permiten representar una serie de reglas que conducen a un valor de clase, un valor numérico o una ecuación lineal, por lo que se clasifican en: Árboles de Clasificación CTs con valores de clase o de presencia o ausencias como hojas del modelo, Árboles de Regresión RTs con valores numéricos constantes como hojas del modelo y Árboles tipo Modelo MTs con ecuaciones lineales como hojas del modelo [24].

Se utilizó el Árbol de Clasificación con el algoritmo clasificador J48 implementado en el software de uso libre Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) [25]. Para implementar los modelos de Árboles de Clasificación se utilizó el mismo enfoque que la RL, es decir, aplicando el 3-fold cross-validation. Se evaluaron los criterios de rendimiento CCI, K de Cohen y AUC.

- *Rendimiento de los modelos.* Para evaluar el rendimiento de los modelos obtenidos usando las diferentes técnicas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: 1) el porcentaje de observaciones

correctamente clasificadas CCI; 2) el coeficiente kappa de Cohen (K de Cohen); 3) el área bajo la curva AUC característica del receptor-operador (curva ROC en inglés); 4) Sensitividad; y 5) Especificidad. Después de correr los modelos para cada posible combinación, se analizaron los resultados obtenidos de los criterios de ajuste que servirían como guía para conocer cuál sería el mejor modelo que representaría el fenómeno.

Para alcanzar un rendimiento satisfactorio del modelo, el CCI, la Sensitividad y la Especificidad debían ser al menos del 70%, el K de Cohen debía ser al menos 0,4 y el AUC debía ser superior a 0,7 [26]. Se tuvieron en cuenta los siguientes rangos de rendimiento del modelo para los valores de K de Cohen en un contexto ecológico de agua dulce: 0,0-0,2: pobre; 0,2-0,4: regular; 0,4-0,6: moderado; 0,6-0,8: sustancial; y 0,8-1,0: excelente [27]. El AUC, que oscila entre 0,5 y 1,0, da una idea de la capacidad de discriminación del modelo. Un modelo con buena capacidad de discriminación es el que puede discriminar correctamente entre presencia y ausencia en un conjunto de datos de evaluación. Se sugiere que un modelo con discriminación perfecta el AUC tiene un valor de 1 y un modelo sin capacidad de discriminación el AUC es igual 0,5 [10, 28]. Los valores entre 0,5 y 0,7 indican una capacidad de discriminación pobre, los valores entre 0,7 y 0,9 indican una capacidad de discriminación razonable y adecuada para muchas aplicaciones y los índices superiores a 0,9 indican una discriminación muy buena [10, 28].

Era posible que, a partir de cada técnica aplicada, resultaran varios modelos que cumplieran los criterios de desempeño y de rendimiento por cada subconjunto, sin embargo, era necesario obtener un único modelo que predijera la variable dependiente o predictora. En ese caso, se realizó una optimización para probar el mejor modelo, esta consistió en elegir el modelo o conjunto de variables que tuvieran mejor desempeño según los criterios descritos y utilizando la función que arrojaba la Regresión Logística o el Árbol de Clasificación y se probó en los otros subconjuntos, montando la función en Excel en cada uno de ellos. A partir de los resultados se estableció en cada subconjunto la matriz de confusión para calcular los criterios de desempeño (CCI, K de Cohen, Sensitividad y Especificidad). Para calcular el AUC en los sets de validación de los modelos de Regresión Logística se utilizó el software estadístico MedCalc versión 19.5.6. Después de este ejercicio se determinó si era posible construir un modelo final que representara el orden objetivo de macroinvertebrados a partir de cada técnica.

Para la distribución de los subconjuntos de datos después del 3 fold cross validation se calculó la prevalencia, es decir, la proporción de ausencias que se presenta del orden objetivo, esto con el objetivo de evaluar el balance de ausencias y presencias ya que, si no es el adecuado, podía generar dificultades y tendencias marcadas en los resultados de los modelos.

- *Modelos de evaluación ecológica basados en índices bióticos de macroinvertebrados.* Para la implementación de los modelos predictivos para conocer la calidad hidrobiológica del agua en el río Bitaco empleando índices bióticos se evaluó una técnica de minería de datos y de aprendizaje automático llamada Árboles de Decisión descrita en párrafos anteriores. Estas técnicas se desarrollaron en función de las variables fisicoquímicas e hidráulicas de la base de datos después del Análisis de Componentes Principales. Para predecir los valores numéricos de los índices ecológicos se usó la técnica Árboles tipo Modelo y para predecir la clasificación de calidad acorde de los índices se usaron los Árboles de Clasificación. Se tuvieron en cuenta los índices BWMP-UNIVALLE, ICE e IIBIAP.

La técnica Árboles tipo Modelo permitió implementar los modelos para predecir el valor de los índices bióticos y se utilizó el algoritmo clasificador M5P implementado en el software de uso libre Waikato Environment for Knowledge Analysis WEKA [24]. Se utilizó la misma distribución de subconjuntos para idoneidad de hábitat (es decir, el 3-fold cross-validation). Para evaluar el rendimiento del modelo obtenido usando los Árboles tipo Modelo se tuvo en cuenta el coeficiente de correlación de Pearson r , el cual mide el grado de relación lineal que tienen dos conjuntos de datos. Se eligieron aquellos modelos que tuvieron valores de r con una correlación mayor o igual a 0.45. Para el coeficiente de correlación r se presentan los siguientes rangos, una correlación muy alta ($0.9 < r \leq 1$), alta ($0.7 < r \leq 0.9$), moderada ($0.45 < r \leq 0.7$), baja ($0.2 < r \leq 0.45$) o sin correlación ($0.0 < r \leq 0.2$).

La técnica Árboles de Clasificación CT permitió predecir la clasificación de los índices bióticos y se utilizó el algoritmo clasificador J48 implementado en el software WEKA [24]. Para implementar los modelos de CT se utilizaron dos enfoques con base a la distribución de los datos: para el primer enfoque se utilizó la misma distribución de subconjuntos para idoneidad de hábitat (es decir, aplicando el 3- fold cross-validation). Para el segundo enfoque, se utilizó el método de remuestreo basado en una técnica de bootstrapping aplicado a la base de datos.

Para cada enfoque se evaluaron los criterios de rendimiento CCI, K de Cohen y AUC. El bootstrapping es un enfoque en el que se utilizó una submuestra más pequeña de los datos disponibles para entrenar y desarrollar los modelos. El conjunto de datos de la submuestra para cada uno de estos modelos se basa en una estratificación. El conjunto de datos estratificados es un conjunto de datos más pequeño generado a partir del conjunto de los datos totales, que tiene el mismo número de observaciones de cada clase de los índices representados en el conjunto [29].

Asimismo, era posible que, a partir de estos ejercicios, resultaran varios modelos que cumplieran los criterios de desempeño y de rendimiento por cada subconjunto, sin embargo, era necesario obtener un único modelo que predijera la variable dependiente, en este caso la clasificación y el valor del índice. Para ello, los mejores árboles resultantes tanto de clasificación como tipo modelo se probaron en los otros subconjuntos, montando la función del modelo en Excel con los demás subconjuntos de datos. Para el caso de los Árboles de Clasificación se determinó la matriz de confusión y a partir de esta los criterios de desempeño. Para calcular el AUC se utilizó el software estadístico MedCalc versión 19.5.6. Para los Árboles tipo Modelo se calculó el coeficiente de correlación de Pearson a partir de la función en Excel COEF.DE.CORREL con los resultados obtenidos. Después de este ejercicio se determinó si era posible construir un modelo final que representara la clasificación y el valor del índice objetivo con cada uno de los enfoques.

2.3.3 Simulación de escenarios

Una vez desarrollados los modelos de Regresión Logística y los Árboles de Decisión se utilizaron para hacer predicciones sobre las variables dependientes (es decir, presencia/ausencia de los órdenes de macroinvertebrados y los valores de los índices bióticos) basándose en otros valores independientes distintos de los que se utilizaron para construir los modelos. Así los modelos resultantes permiten considerar el impacto de fuerzas motrices en la calidad ecológica del agua. En este caso, se realizó la evaluación del impacto al definir un caudal ambiental en la calidad ecológica del río Bitaco, mediante los resultados de un grupo de escenarios de modelación de la calidad del agua utilizando la herramienta QUAL2Kw para la corriente principal río Bitaco y sus dos principales tributarios usando los caudales ambientales calculados para cada sitio de monitoreo.

Fue necesario realizar un procesamiento de esa información escogiendo las variables predictoras que eran utilizadas para la implementación de los modelos ecológicos, y se construyó una base de datos final de la información de entrada de cada escenario. El procedimiento para la simulación de los escenarios fue utilizar los datos de salida del QUAL2Kw ya procesados (variables de calidad y cantidad de agua) como datos de entrada para los modelos ecológicos finales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Recopilación de información disponible, preprocesamiento y procesamiento de base de datos

La evaluación de posibles valores atípicos en el conjunto de datos con las 56 mediciones de parámetros hidráulicos, fisicoquímicos microbiológicos mostraron valores atípicos en 2 estaciones de monitoreo durante el segundo muestreo en la variable *fold*, debido a que se presentaron fuertes lluvias con arrastre superficial de partículas en la cuenca hidrográfica en los días en que se tomaron las muestras.

Asimismo, a partir de las 38 variables hidráulicas, fisicoquímicas y microbiológicas medidas, se eliminaron aquellas variables las cuales habían sido medidas solo en ciertas estaciones, así, los parámetros Carbono

orgánico Total COT e Hidrocarburos Totales HPT fueron eliminados. De igual forma, según los resultados de las herramientas gráficas de diagrama de cajas y alambres (Box Plots) y Cleveland Dot Plots en el software XLSTAT versión 2016, se pudo observar que las variables Cloruros, Fenoles, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno total Kjeldahl, Sólidos Sedimentables, Clorofila y Sulfatos presentaron valores iguales en la mayoría de las estaciones al límite de detección del laboratorio, por ende, se eliminaron.

Igualmente, para permitir el acoplamiento de los modelos ecológicos desarrollados con el modelo de calidad del agua de agua QUAL2Kw, se tuvieron en cuenta exclusivamente las variables modeladas por el modelo QUAL2Kw, así, los parámetros Color verdadero, SAAM, Dureza Total, Turbiedad, Grasas y Aceites y Coliformes Totales fueron eliminados.

Seis estaciones no se tuvieron en cuenta debido a que no contaban con la información necesaria (Variable respuesta) para la construcción de los modelos ecológicos. Finalmente se obtuvo una base de datos con la siguiente distribución: 20 variables predictoras (variables hidráulicas, fisicoquímicas y microbiológicas) y 8 variables respuesta (presencia y ausencia de 5 órdenes de macroinvertebrados y 3 Índices de calidad hidrobiológica). De todas las variables se contaba con un total de 48 mediciones.

En cuanto al procesamiento y depuración para la construcción de la base de datos usada en la implementación de los modelos ecológicos, se utilizó el Análisis de Componentes Principales ACP, encontrando que los 10 primeros CP explican el 94.46% de la varianza de los datos. Se revisó la correlación entre las potenciales variables predictoras, es decir los 10 factores, mediante el coeficiente de Spearman (s) y no se obtuvieron valores altos de correlación: no correlación positiva ($0,0 < S \leq 0,2$) y no correlación negativa ($-0,2 < S \leq -0,0$).

Con relación a la correlación entre las potenciales variables predictoras basándose en el ACP y con las variables respuesta, el OD mostró la mayor correlación con los Índices BMWP e IIBIAP (0.466 y .0395 respectivamente), mientras que la velocidad del agua y la profundidad del agua mostraron la menor correlación con estos índices (para la velocidad tuvo valores de -0.267 y -0.290 respectivamente y para la profundidad de -0.008 y 0.002 respectivamente). Los factores seleccionados correspondieron a DBO Ultima Total, Alcalinidad, Sólidos suspendidos totales SST, Velocidad, Fosforo Total PT, Profundidad, Oxígeno Disuelto OD, Nitratos, Temperatura T y DQO Total.

3.2 Implementación de los modelos

3.2.1 Modelo hidráulico y de calidad fisicoquímica del agua

Los resultados de los procesos de calibración y verificación del QUAL2Kw, mostraron que el modelo de calidad del agua reproduce con buena precisión la tendencia de los datos observados en la mayoría de las estaciones, en los sectores evaluados. Se destaca la representatividad que tiene el modelo en los tramos críticos de calidad del agua en donde se reproduce con buena precisión la tendencia y los valores máximos y mínimos de los parámetros, especialmente en el caudal, los sólidos suspendidos totales, Nitratos, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno total, OD, DBO, Detritus, Fosforo orgánico, Alcalinidad, pH y Coliformes fecales.

Los menores ajustes se obtuvieron en la modelación del Fosforo inorgánico, Nitrógeno Orgánico y Phytoplankton. Esto en parte puede estar atribuido a la incertidumbre en la determinación en laboratorio de los valores bajos de estos parámetros, debido a los límites de detección reportados por el laboratorio.

Como ejemplo, los resultados del modelo calibrado para condiciones secas (es decir, los valores promedios diarios de los parámetros hidráulicos, fisicoquímicas y microbiológicos medidos durante la campaña con propósito de calibración) son presentadas en la Figura 5. Esta condición es la más crítica en cuanto a la calidad y cantidad de agua de las corrientes hídricas. Con la autocalibración se buscó ajustar el valor del RMSE, que cuantifica cuán diferente es un conjunto de valores. Cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores predichos y observados. Se observó que el valor del RMSE es de 0.19, un valor bajo, sin embargo, en futuros ejercicios, se busca que este valor baje.

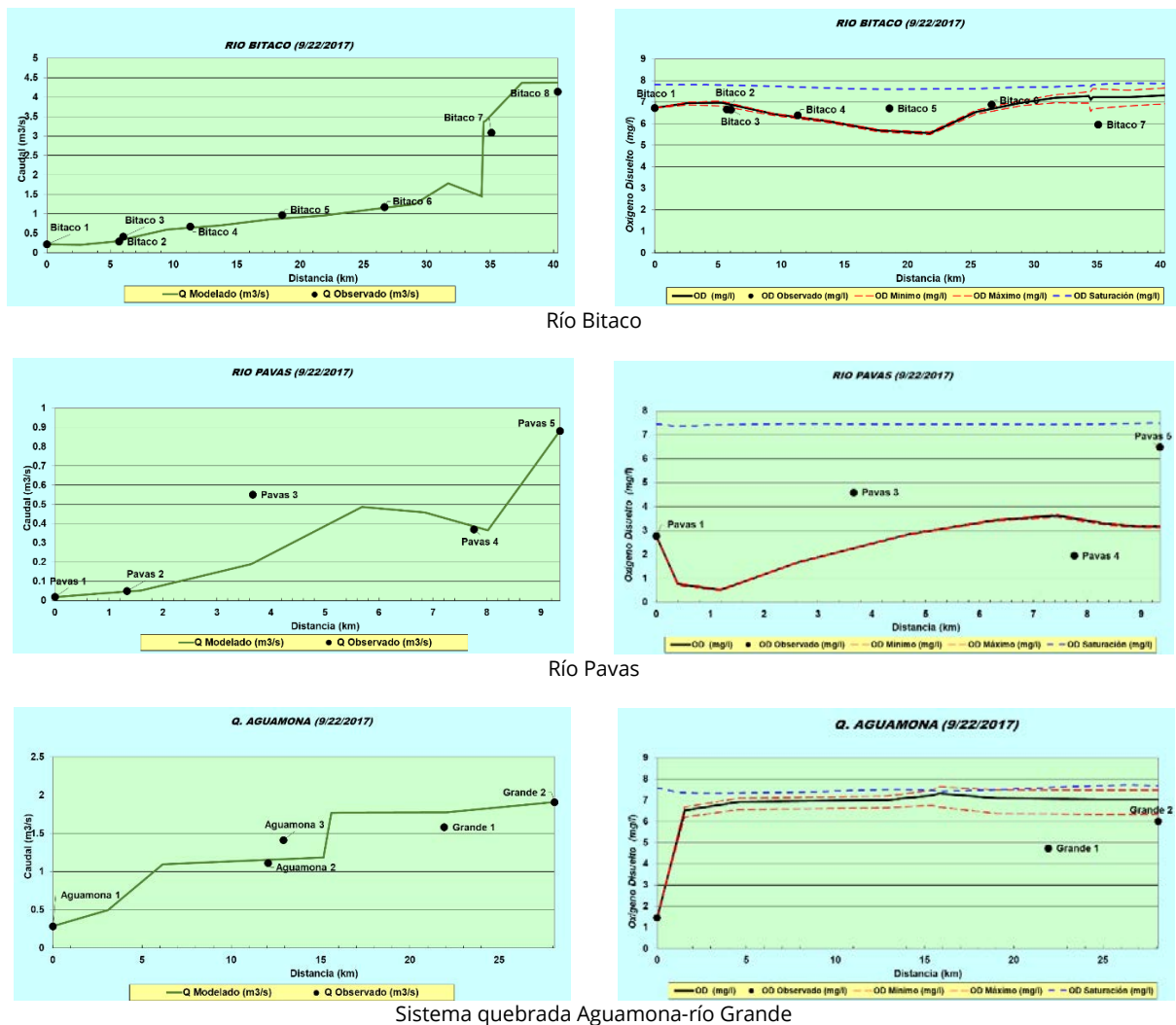


Figura 5. Resultados de la calibración del QUAL2Kw para los ríos Bitaco, Pavas y sistema Quebrada Aguamona-río Grande durante la campaña de monitoreo en condición seca o de caudal bajo para el Caudal y Oxígeno disuelto OD. Distancia medida desde la primera estación [6]

3.2.2 Modelos de ocurrencia para grupos de macroinvertebrados seleccionados

Para la construcción de los modelos de evaluación ecológica con base a datos de presencia y ausencia se implementaron las técnicas de modelación de Regresión Logística RL y Arboles de Clasificación CT. Como variables respuesta para los modelos de ocurrencia se definieron los órdenes que representaban buena calidad: Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, y consolidado Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera EPT y los que representaban mala calidad: Díptera.

Después de realizar el ejercicio de optimización para probar los mejores modelos de Regresión Logística, se obtuvieron dos modelos para representar los órdenes Ephemeroptera y Plecoptera, en donde las variables más importantes que predecían la presencia de las mismas en la subcuenca del río Bitaco y sus principales tributarias eran Oxígeno disuelto y Nitratos. Los modelos RL para los órdenes mencionados se muestran en las ecuaciones (4) y (5).

$$P_{(RL,Ephemeroptera)} = \frac{1}{1 + \exp(-(-6,39664837853082+0,8267429802199790D))} \quad (4)$$

$$P_{(RL,Plecoptera)} = \frac{1}{1 + \exp(-(-2,3076342940051-3,56912712855141*Nitratos))} \quad (5)$$

Para los Arboles de Clasificación, después de realizar el ejercicio de optimización se obtuvieron tres modelos para representar los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y díptera (Figura 6).

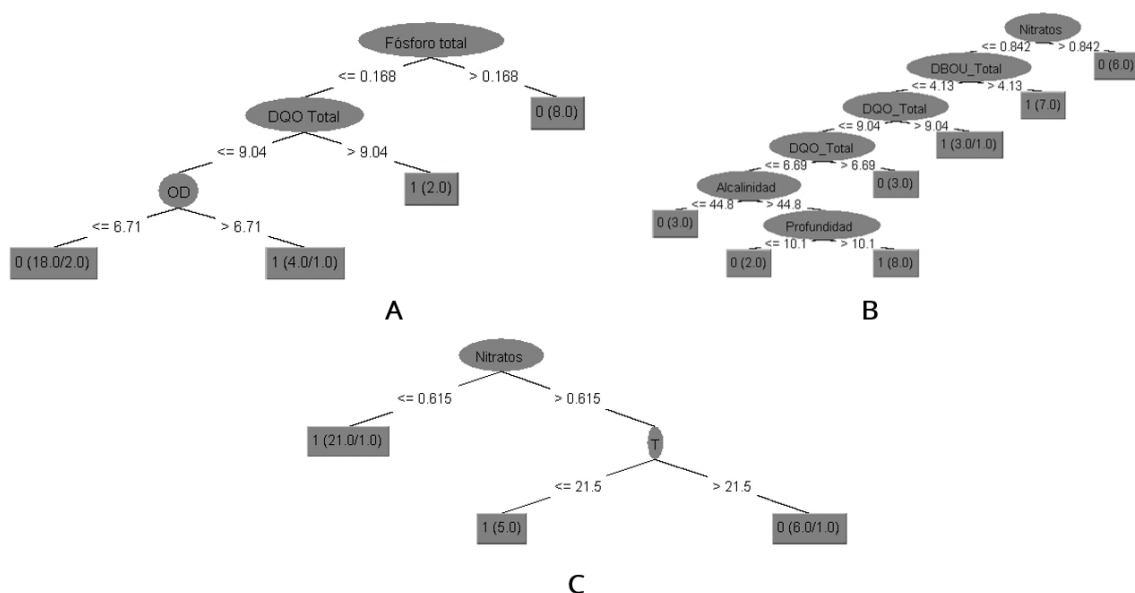


Figura 6. Árboles de clasificación (Reglas) para predecir la presencia o ausencia de los órdenes: A) Ephemeroptera, B) Plecoptera, y C) Díptera para los ríos Bitaco, Pavas y sistema Quebrada Aguamona-río Grande

La presencia de Ephemeroptera en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía el Fósforo Total con valores de esta variable menores e iguales a 0.168 mg/l y valores de DQO Total mayores a 9.04 mg/l y a una segunda regla con valores de DQO menores e iguales a 9.04 mg/l y OD mayores a 6.71 mg/l.

La presencia de Plecoptera en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía los Nitratos con valores menores e iguales a 0.842 mg/l y valores de DBO Ultima Total mayores a 4.13 mg/l y a una segunda regla con valores de DBO Ultima Total menores e iguales a 4.13 mg/l, DQO Total con valores menores e iguales a 6.69 mg/l, Alcalinidad con valores mayores e iguales a 44.8 mg/l y profundidad con valores mayores a 10.1 cm.

La presencia de Diptera en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía los Nitratos con valores menores e iguales a 0.615 mg/l y a una segunda regla con valores de Temperatura menores e iguales a 21.5°C.

Para la distribución de los subconjuntos de datos después del 3-fold cross-validation se calculó la prevalencia, es decir, la proporción de ausencias que se presenta del orden objetivo, esto con el objetivo de evaluar el balance de ausencias y presencias ya que, si no es el adecuado, podía generar dificultades y tendencias marcadas en los resultados de los modelos.

Se pudo evidenciar que para el orden Ephemeroptera, la ausencia fue mayor en comparación a la presencia (prevalencia de 20,83%), a diferencia de Plecoptera, Trichoptera, consolidado EPT y Diptera que su presencia fue mayor (prevalencia de 52,08%, 83,33% y 77,08% respectivamente). Con relación al balance de ausencias y presencias en cada uno de los subconjuntos, los órdenes Ephemeroptera y Plecoptera tuvieron una buena distribución a diferencia de Trichoptera, consolidado EPT y Diptera, situación que podía generar dificultades y tendencias marcadas en los resultados del modelo. Es por ello que se realizó una nueva distribución de la base de datos para que fuera lo más uniforme posible y existiera un balance de ausencias y presencias en cada uno de los subconjuntos.

Al realizar la nueva distribución de los datos, se evidenció que para los órdenes Ephemeroptera y Plecoptera, no existieron cambios significativos en su distribución porque previo al ejercicio ya había uniformidad de sus datos, a diferencia de los órdenes Trichoptera, consolidado EPT y Diptera que se evidencia que podría mejorar su balance de ausencias y presencias en cada uno de los subconjuntos. Para estos ordenes se volvió a realizar el ejercicio de implementación de los modelos de Regresión Logística y Arboles de Clasificación con la nueva distribución de la base de datos para cada subconjunto.

Después de realizar el ejercicio de optimización para probar los mejores modelos de Regresión Logística (RL), se obtuvo un modelo para representar el orden Trichoptera, indicador de buena calidad, que previamente al ejercicio sin uniformidad no había sido posible desarrollar un modelo RL, en donde la variable más importante que predecían la presencia de la misma en la subcuenca del río Bitaco y sus principales tributarias era DBO Última Total. El modelo RL se muestra en la ecuación (6).

$$P_{(RL,Trichoptera)} = \frac{1}{(1 + \exp(-(2,60086977271389 - 0,405023851183089 * DBO \text{ última Total})))} \quad (6)$$

Asimismo, con la nueva distribución de los datos uniformes de los órdenes Trichoptera, consolidado EPT y Díptera se repitió el ejercicio de árboles de clasificación. Después de realizar el ejercicio de optimización se obtuvieron tres modelos para representar los órdenes mencionados (Figura 7).

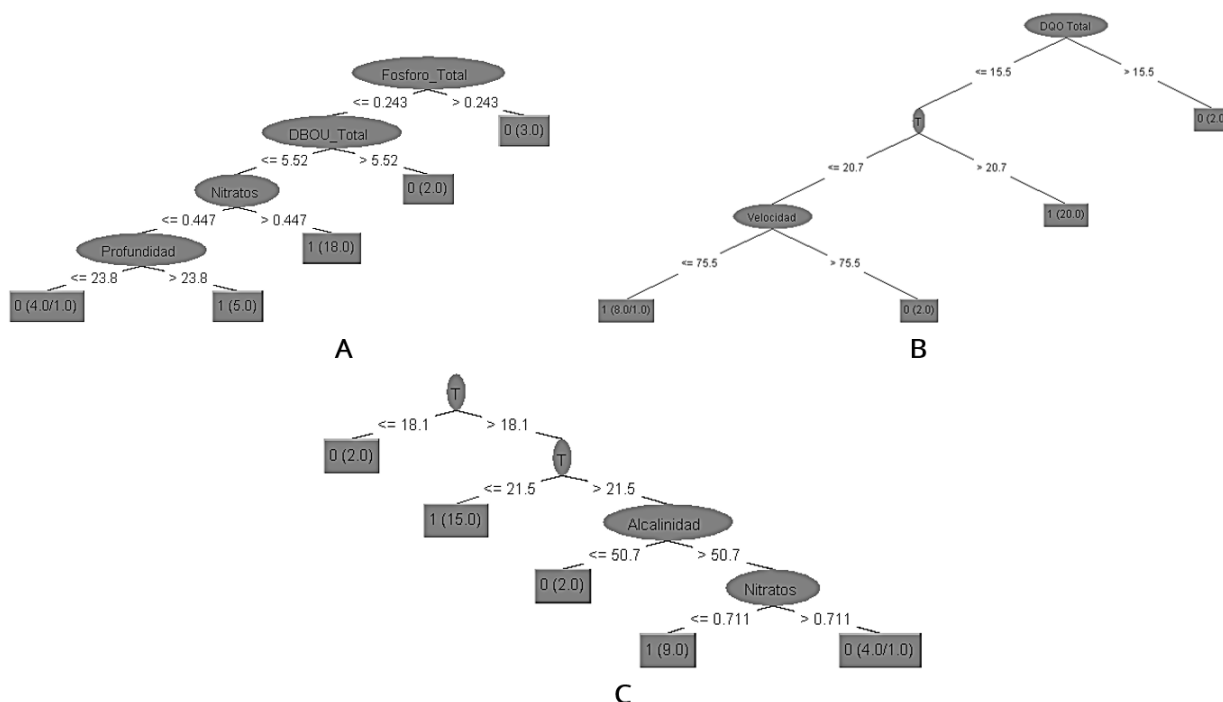


Figura 7. Árboles de clasificación (Reglas) para predecir la presencia y/o ausencia de los órdenes: A) Trichoptera, B) EPT consolidado, y C) Díptera para los ríos Bitaco, Pavas y sistema Quebrada Aguamona-río Grande

La presencia de Trichoptera en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía el Fósforo Total con valores de esta variable menores e iguales a 0.243 mg/l, valores de DBO Última Total menores e iguales a 5.52 mg/l, valores de Nitratos mayores a 0.447 mg/l y a una segunda regla con valores de Nitratos menores e iguales a 0.447 mg/l y Profundidad mayores a 23.8 cm.

La presencia de EPT consolidado en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía la DQO Total con valores menores e iguales a 15.5 mg/l y valores de Temperatura mayores a 20.7°C y a una segunda regla con valores de Temperatura menores e iguales a 20.7°C y de Velocidad menores e iguales a 75.5 cm/s.

La presencia de Díptera en la subcuenca del río Bitaco estuvo asociada a una primera regla que definía la Temperatura con valores mayores a 18.1°C, pero menores a 21.5°C y a una segunda regla si la Temperatura era mayor a ese valor, la Alcalinidad debía ser mayor a 50.7 mg/l y los Nitratos menores a 0.711 mg/l.

La evaluación de la fiabilidad de los modelos LR y árboles de clasificación de cada uno de los ejercicios (Tabla 1) mostró que todos los modelos de las diferentes técnicas (Regresión Logística y Árboles de Clasificación) para Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (Uniforme), EPT Consolidado (Uniformes) y díptera (No uniforme y Uniforme) tienen una razonable capacidad de discriminación y discriminan correctamente entre sitios ocupados (presencia) y desocupados (ausencia) en el conjunto de datos (CCI > 70%, K ≥ 0.40 y AUC > 70%, Sensitividad > 70% y Especificidad > 70%).

Tabla 1. Criterios de desempeño de los modelos de Regresión Logística (RL) y Árboles de Clasificación (CT) en el conjunto de datos de calibración y validación (CCI, Kappa de Cohen; AUC, Sensitividad y Especificidad)

Orden	Técnica	Set	CCI	K de Cohen	AUC	Sensitividad	Especificidad
Ephemeroptera	RL	Calibración	0.79	0.30	0.77	0.34	0.92
		Validación	0.83	0.29	0.83	0.25	0.97
Plecoptera	RL	Calibración	0.71	0.41	0.74	0.84	0.57
		Validación	0.71	0.41	1	0.84	0.57
Trichoptera (Uniforme)	RL	Calibración	0.79	0.31	0.73	1	0.23
		Validación	0.79	0.31	0.69	1	0.23
Ephemeroptera	CT	Calibración	0.85	0.61	1	0.80	0.87
		Validación	0.85	0.62	0.86	0.81	0.87
Plecoptera	CT	Calibración	0.88	0.75	1	0.88	0.87
		Validación	0.88	0.75	0.83	0.88	0.87
Trichoptera (Uniforme)	CT	Calibración	0.85	0.66	0.99	0.86	0.85
		Validación	0.85	0.69	0.83	0.85	0.87
Diptera	CT	Calibración	0.84	0.54	0.91	0.92	0.60
		Validación	0.94	0.77	0.83	0.97	0.75
Diptera (Uniforme)	CT	Calibración	0.90	0.74	0.99	0.89	0.91
		Validación	0.90	0.76	0.83	0.88	0.92

3.2.3 Modelos de evaluación ecológica basados en índices bióticos de macroinvertebrados

Después de realizar el ejercicio de optimización para probar los mejores modelos de Árboles de Clasificación para predecir la clasificación de los índices objetivo en los dos enfoques, se obtuvo un modelo con el segundo enfoque (utilizando la misma distribución de subconjuntos para idoneidad de hábitat) para representar la clase del Índice IIBIAP, la cual está relacionada con las variables Temperatura, Velocidad, Fosforo Total y Alcalinidad.

La clase *Buena* del índice IIBIAP estuvo asociada a una primera regla que definía la Temperatura con valores de esta variable menores e iguales a 20.3°C y valores de Velocidad menores e iguales a 53.6 cm/s, si la velocidad era mayor a ese valor el índice clasificaba como *Pobre*.

Una segunda regla definía la Temperatura con valores de esta variable mayores a 20.3°C y Fosforo Total con valores menores en iguales a 0.18 mg/l para una clase *Media*, si el Fosforo Total era mayor a ese valor y la Alcalinidad era mayor a 52.7 mg/l se clasificaba como *Pobre*, si la alcalinidad era menor o igual a ese valor se clasificaba como *Media* (Figura 8).



Figura 8. Árbol de Clasificación (Reglas) para predecir la clasificación del índice IIBIAP para los ríos Bitaco, Pavas y sistema Quebrada Aguamona-río Grande

La evaluación de la fiabilidad del modelo de la clasificación del índice IIBIAP (Tabla 2) mostró que tiene una razonable capacidad de discriminación de la clasificación del índice en el conjunto de datos (CCI>70%, $K \geq 0.40$ y AUC>70%).

Tabla 2. Criterios de desempeño del modelo de Árboles de clasificación de la clase del índice IIBIAP en el conjunto de datos de calibración y validación (CCI, Kappa de Cohen; AUC, Sensitividad y Especificidad)

Índice	Set	CCI	K de Cohen	AUC
IIBIAP	Calibración	0.79	0.60	0.89
	Validación	0.81	0.57	0.83

Después de realizar el ejercicio de optimización para probar los mejores modelos de Árboles tipo Modelo para predecir el valor numérico de los índices objetivo, se construyó un árbol para comprender la relación entre la calidad biológica del agua expresada en el valor numérico del índice BMWP y las variables predictoras. El modelo arrojó una ecuación lineal relacionada con las variables Alcalinidad, DBO Ultima Total y Solidos Suspendidos Totales (SST) (Figura 9).

$$\begin{aligned}
 & \text{LM num: 1} \\
 & \text{BMWP =} \\
 & \quad -0.8227 * \text{Alcalinidad} \\
 & \quad - 4.9966 * \text{DBOU_Total} \\
 & \quad - 1.0758 * \text{SST} \\
 & \quad + 167.3848
 \end{aligned}$$

Figura 9. Árbol tipo Modelo (Reglas) para predecir el valor numérico del índice BMWP para los ríos Bitaco, Pavas y sistema Quebrada Agumona-río Grande

La evaluación de la fiabilidad de la Árbol tipo Modelo mostró que en el conjunto de datos de calibración el modelo funcionó bien, con $r = 0.68$, mientras que, para el conjunto de validación, el rendimiento del modelo fue de $r = 0.65$ lo que corresponde a una correlación moderada.

3.2.4 Simulación de escenarios

En este caso, se realizó la evaluación del impacto al definir un caudal ambiental en la calidad ecológica del río Bitaco, mediante los resultados de un grupo de escenarios de modelación de la calidad del agua utilizando la herramienta QUAL2Kw para la corriente principal río Bitaco y sus dos principales tributarios usando los caudales ambientales calculados para cada sitio de monitoreo. El procedimiento para la simulación de cada escenario fue utilizar los datos de salida del QUAL2Kw ya procesados (variables de calidad y cantidad de agua) como datos de entrada para los modelos ecológicos finales.

Se tuvieron en cuenta 3 condiciones hidrológicas diferentes, el Escenario 1 corresponde a una condición de caudal ambiental en periodo húmedo o invierno (caudales altos), el Escenario 2 corresponde a una condición de caudal ambiental en periodo normal y el Escenario 3 corresponde a una condición de caudal ambiental en periodo seco o verano (caudales bajos). Cabe resaltar que el caudal es mayor en el escenario 1 y desciende hasta el mínimo valor en el escenario 3. A manera de ejemplo se muestran los resultados al aplicar el modelo de presencia y ausencia del orden Ephemeroptera (Árbol de Clasificación) y Diptera (Árbol de Clasificación) y el modelo de predicción del valor del índice BMWP (Tabla 3).

Tabla 3. Impacto de diferentes escenarios sobre la calidad ecológica del agua del río Bitaco y sus principales tributarios, expresado como el valor índice biótico BMWP y la presencia/ausencia de macroinvertebrados (Epheme: Ephemeroptera y Dip: Diptera)

Estación	Escenario 1. (condición de caudal ambiental en caudales altos)			Escenario 2. (condición de caudal ambiental en periodo normal)			Escenario 3. (condición de caudal ambiental en caudales bajos)		
	Epheme.	Dip	Valor BMWP	Epheme.	Dip	Valor BMWP	Epheme.	Dip	Valor BMWP
Bitaco 1	1	1	134	0	1	134	1	1	134
Bitaco 2	0	1	78	0	1	72	0	1	67
Bitaco 3	0	1	73	0	1	68	0	1	64
Bitaco 4	0	1	76	0	1	72	0	1	70
Bitaco 5	1	1	62	1	1	60	1	1	60
Bitaco 6	1	1	74	1	0	72	1	0	71
Bitaco 7	1	0	86	1	0	84	1	0	83
Bitaco 8	1	0	87	1	0	84	1	0	84
Pavas 1	0	1	66	0	1	66	0	1	66
Pavas 2	0	1	24	0	1	24	0	1	23
Pavas 3	0	1	34	0	1	30	0	1	27
Pavas 4	0	1	46	0	1	44	0	1	43
Pavas 5	0	1	51	0	1	49	0	1	49
Agumona 1	0	1	88	0	1	88	0	1	88
Agumona 2	0	1	69	0	1	65	0	1	63
Agumona 3	0	1	69	0	1	65	0	1	63
Grande 1	0	1	69	0	1	67	0	1	65
Grande 2	1	1	74	1	1	73	1	1	72

El concepto de caudal ambiental se encuentra ampliamente tratado en la literatura. Existen diferentes definiciones, desde la más sencilla hasta la más compleja y técnica, no obstante, tienen en común que todas se refieren a la idea del volumen del agua que se debe mantener en un río para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida de los organismos que lo habitan, así como garantizar los diferentes servicios ecosistémicos, incluidos el acceso al agua para los usuarios del recurso [7].

A partir de los resultados de la modelación de escenarios se puede inferir que a medida que el caudal disminuye en cada condición hidrológica, el valor del índice BMWP disminuye, es decir que la calidad del agua también se ve afectada. Por ejemplo, en la estación de monitoreo Aguamona 2, en el escenario 1 el valor del índice es de 69 en la condición de caudal ambiental en periodo invierno, no obstante, en el escenario 3 en donde se encuentra una condición de verano o caudales bajos el valor es de 63. Es importante anotar que, en condiciones de caudales altos asociados a temporadas de alta precipitación, el transporte de sustancias contaminantes o su dilución es mayor.

En el caso de las corrientes, esta condición permite un rápido transporte de las sustancias contaminantes, así como una mezcla rápida y corta residencia con un posible menor impacto ecológico. Por el contrario, en condiciones de caudales bajos o volúmenes mínimos, los procesos de asimilación y dilución de las cargas contaminantes son menores, sumado a largos tiempos de residencia que brindan como resultado impactos ecológicos adversos.

3.3 Enfoque de modelación ecológica integrada

La mayoría de los marcos de modelación matemática tradicionales en ríos (marco de modelación hidráulica, marco de modelación de calidad fisicoquímica del agua, marco de modelación ecológica) tienden a representar procesos individuales e independientes para cada análisis, careciendo de un enfoque holístico que permita evaluar las relaciones causa-efecto entre las condiciones fisicoquímicas, hidromorfológicas y ecológicas de los ríos.

En este estudio se empleó un Marco de Modelación Ecológica Integrada-MMEI para evaluar la degradación ecológica de los ríos generada por la contaminación fisicoquímica y las perturbaciones hidromorfológicas. Este enfoque integró un modelo matemático hidráulico y fisicoquímico de la calidad del agua con modelos ecológicos acuáticos. La integración de los modelos a través del MMEI permitió una evaluación holística que no podía lograrse al examinar cada componente individual del sistema por separado. Es decir, permite considerar simultáneamente el impacto de diferentes presiones fluviales, como la descarga de aguas residuales que afecta el estado fisicoquímico y la degradación del hábitat causada por cambios en las condiciones hidromorfológicas como por ejemplo embalses, sobre la calidad ecológica del agua. El MMEI permite evaluar la degradación ecológica en los ríos y ayuda a entender este problema y podría proporcionar información crucial para los gestores del agua en la toma de decisiones ambientales.

El MMEI está *integrado* en el sentido de que la salida de los modelos de cantidad y calidad del agua es la entrada para los modelos ecológicos. En el MMEI se calculan relaciones directas entre un conjunto de variables predictoras (físico-químicas e hidráulicas) y variables de respuesta ecológica (por ejemplo, presencia y ausencia de una taxa de macroinvertebrados o el valor de un índice biológico). Este tipo de enfoque es flexible, aplicable y transferible a otras regiones del mundo, debido a que se pueden actualizar o sustituir los modelos ecológicos por otros mejores cuando la información de datos fisicoquímicos, hidráulicos y biológicos se actualice. No obstante, es necesario un cambio en la estrategia de seguimiento de los ríos hacia la recolección de datos que incluyan mediciones simultáneas de las variables para mejorar los modelos ecológicos.

Para el caso de la modelación del río Bitaco, se encontró que es necesario un enfoque de modelación ecológica integrada, como el planteado en marco MMEI, que considere los aspectos fisicoquímicos, hidromorfológicos y ecológicos en la gestión del agua. El MMEI permitió realizar una evaluación de tres escenarios de definición de Caudal ambiental y sus implicaciones en la calidad ecológica del agua del río Bitaco.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se aplicó un Marco de Modelación Ecológica Integrada (MMEI) para apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua que puede aplicarse a cualquier cuenca hidrográfica. Este marco permite evaluar la eficacia de diferentes estrategias de la gestión de los ríos mediante la modelación de escenarios y su impacto en la calidad ecológica de los ríos. El marco MMEI se probó en un caso de estudio en el río Bitaco en el departamento del Valle del Cauca en Colombia, con la integración de un modelo hidráulico y fisicoquímico de la calidad del agua denominado QUAL2Kw y tres tipos de modelos ecológicos.

Estos modelos ecológicos permitieron predecir la presencia de cinco ordenes objetivo de macroinvertebrados (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera y consolidado EPT), reconocidos por ser sensibles a la contaminación y Diptera (tolerante a la contaminación). Igualmente, permitieron predecir la clasificación del índice biótico IIBIAP y el valor numérico del índice biótico BMWP.

El uso de modelos de ocurrencia de macroinvertebrados y modelos de evaluación ecológica a través de índices bióticos, permiten predecir los cambios en los ríos al evaluar el grado de perturbación hidráulica y fisicoquímica en los mismos de una forma rápida y eficaz. El enfoque holístico permite el uso de modelos para simular las condiciones fisicoquímicas, hidromorfológicas y ecológicas de los ríos, siendo esto un aspecto clave en la gestión integrada del recurso hídrico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS y a la Universidad Autónoma de Occidente por la base de datos e información utilizada para el desarrollo de esta investigación, la cual fue obtenida en el marco del proyecto Plan de Ordenamiento del recurso Hídrico del río Bitáco (PORH Bitaco) Convenio CVC-UAO No. 132 de 2017.

REFERENCIAS

- [1] J. Castillo, C. Espinoza. "Modelo de simulación para la calidad de agua en un río. Santiago de Chile": *Universidad de Chile*, 2005.
- [2] W. Bauwens. "Water Quality Management". Class notes for Academic Year 2008- 2009. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium, 2009.
- [3] D. Kraft. "Model Integration: Application in Ecology and for Management. In *Modelling complex ecological dynamics*", Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, p. 301-320.
- [4] J.E. Holguin-Gonzalez, P. Boets, A. Alvarado, F. Cisneros, M.C. Carrasco, G. Wyseure & P.L. Goethals. "Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador". *Ecological modelling*, vol. 254, pp. 1-14, 2013.
- [5] G. J Pelletier, C.S. Chapra, H.Tao "QUAL2Kw, a framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration". *Environmental Modelling and Software* vol 21, no 3, pp.419-4125, 2006.
- [6] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- CVC y Universidad Autónoma de Occidente-UAO "Proyecto Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico-PORH del río Bitaco. Informe Ejecutivo. Convenio CVC-UAO No. 132 de 2017". Noviembre 2019. [Online]. Disponible: <https://www.cvc.gov.co/documentos/planes-y-programas/planes-de-ordenamiento-del-recurso-hidrico-porh/vigencia-2019/rio>
- [7] M.D.C Zúñiga, W. Cardona, J. Cantera, Y. Carvajal, L. Castro. "Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental" *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*, vol. 1, p. 176-200. 2009.
- [8] L.C Forero, M. Longo, J.J Ramirez, & G. Chalar. "Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICE RN-MAE), Colombia". *Revista de biología tropical*, vol 62: suppl.2: pp 233-247, 2014.
- [9] Carrasco, M. "Integridad biótica y su aplicación a una propuesta de gestión para los ríos Tomebamba y Yanuncay en Cuenca-Ecuador" Master dissertation, Universidad de Querétaro, México, 2008.
- [10] A. Zuur, E.N Ieno, N. Walker, A.A. Saveliev, G.M. Smith, G. M. "Mixed effects models and extensions in ecology with R". *Science & Business Media*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, 574 pp.
- [11] M. A. M. Barrera. "Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia". *Movimiento científico*, vol. 8, no 1, p. 98-104. Diciembre 2014.
- [12] J. Holguin Gonzalez. "Integrated ecological modelling for decision support in river management" PhD dissertation, Ghent University, Belgium, 2013.
- [13] S.C Chapra, G.J Pelletier *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (version 2.11): Documentation and User's Manual*. Civil and Environmental Eng. Dept, Tufts Univ., Medford, MA., 2008.

- [14] S.C Chapra, G.J Pelletier. "QUAL2Kw: a modeling framework for simulating river and stream water quality, version 6: documentation and user's manual", Draft, 2019.
- [15] P.R. Kannel, S. Lee, Y.S.Lee, S.R. Kanel, G.J. Pelletier "Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal". *Ecological Modelling*, vol 202, 503-517, 2007.
- [16] R. Aspinall. "Use of logistic regression for validation of maps of the spatial distribution of vegetation species derived from high spatial resolution hyperspectral remotely sensed data". *Ecological Modelling*, vol. 157, no 2-3, pp. 301-312, 2002.
- [17] R. Aspinall. "Modelling land use change with generalized linear models a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana". *Journal of Environment Management*, vol. 72, no 1-2, p. 91-103., 2004.
- [18] S.P Rushton, S.J Ormerod, G. Kerby. "New paradigms for modelling species distributions?" *Journal of Applied Ecology*, vol. 41, no 2, p. 193-200, 2004.
- [19] B. Ahmadi-Nedushan, A. St-Hilaire, M. Berube, E. Robichaud, N. Thiemonge, B. Bobee "A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment". *River Research and Applications*, vol. 22, no 5, p. 503-523, 2006.
- [20] J. Pearce y S. Ferrier. "Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression". *Ecological modelling*, vol. 133, no 3, p. 225-245, 2000.
- [21] Addinsoft. "Statistical Software XLSTAT. User Manual", 2021. Recuperado: <http://www.xlstat.com/en/products/>
- [22] P. McCullogh, J.A Nelder. *Generalized Linear Models, 2nd ed.* Chapman and Hall, London, 1989.
- [23] M. Debeljak y S. Džeroski. "Decision trees in ecological modelling". *Modelling Complex Ecological Dynamics*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 197-209.
- [24] L. Stravs, M. Brilly, M. SRAJ. "Precipitation interception modelling using machine learning methods—the Dragonja River basin case study", *Practical Hydroinformatics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 347-358.
- [25] I. Witten y E. Frank. "Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations". *Acm Sigmod Record*, vol. 31, no 1, p. 76-77, 2002.
- [26] Manel, H.C Williams, S. J Ormerod. "Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence". *Journal of Applied Ecology* vol. 38, no 5, p. 921-931, 2001.
- [27] W. Gabriels, P.L. M Goethals, A. Dedecker, S. Lek, N., De Pauw. "Analysis of macrobenthic communities in Flanders Belgium, using a stepwise input variable selection procedure with artificial neural networks". *Aquatic Ecology*, vol. 41, no 3, p. 427-441, 2007.
- [28] JR. Hosmer, W. David, Staley, Lemeshow, Sturdivant, X. Rodney. *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons, 2013.
- [29] G. Everaert, I. Pauwels, P. Boets, E. Verduin, M.A.A de la Haye, C. Blom, P.L.M Goethals. "Model-based evaluation of ecological bank design and management in the scope of the European Water Framework Directive". *Ecological Engineering*, vol. 53, p. 144-152, 2013.

Desarrollo de un aplicativo para observar el comportamiento de la calidad de aire basado en valores de PM2.5 en una red de monitoreo

Walter Pardavé Livia¹
Edwar Mauricio Sánchez Galvis²
Universidad de Santander
Colombia

El proyecto de investigación trata sobre la implementación de un aplicativo app denominado SIMBU, que permita a cualquier ciudadano observar el comportamiento de la calidad de aire basado en valores de PM2.5 en una red de monitoreo en 10 puntos portátiles del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia, en especial en la comuna centro de la ciudad, donde se realizará mediciones continuas con dispositivos electrónicos de bajo costo, con base en tecnología Arduino y que se están diseñando y desarrollando en la Universidad de Santander. El objetivo general busca crear una red de monitoreo de PM2.5 en diez puntos estratégicos del área metropolitana con herramientas electrónicas de bajo costo, apoyadas en una app denominada SIMBU. La metodología de trabajo comprende la identificación de los puntos estratégicos mediante sistemas de información geográfica, el diseño y desarrollo de las herramientas electrónicas de medición de PM2.5, mediciones de PM2.5 con validación mediante equipos convencionales Hi-Vol, el desarrollo de la app SIMBU y la aplicación del seguimiento del monitoreo. Los resultados esperados del proyecto comprenden: 1) prototipo de equipos de monitoreo de PM2.5, 2) mapas de medición de PM2.5, 3) App de monitoreo de PM2.5, y 5) validación de los datos obtenidos. El impacto esperado será tener un monitoreo continuo de PM2.5 en la ciudad, para la planeación y ejecución de acciones de mejoramiento y control de calidad del aire que propendan por una mayor calidad de vida y salud adecuada de la población. En este trabajo se presenta la primera fase del desarrollo del proyecto que comprende el diseño y desarrollo del dispositivo electrónico de bajo costo para medición de PM2.5.

¹ Contacto: wpardaveudes@gmail.com

² Contacto: mauriciosanchez8711@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Por el acto continuo de respirar, los seres humanos, y otros seres vivos, estamos expuestos tanto a los contaminantes primarios, procedentes directamente de las fuentes de emisión, como a los contaminantes secundarios que se originan por interacción química entre los contaminantes primarios y los componentes normales de la atmósfera [1]. Diferentes estudios epidemiológicos han sugerido que la exposición a las casi 250 sustancias que se han identificado en el aire y se consideran peligrosas para la salud humana, está relacionada con la morbilidad y mortalidad de la población [2].

Como las ciudades son los espacios de mayor concentración humana y en los que se encuentran las principales fuentes permanentes de emisión de contaminantes a la atmósfera, los indicadores de salud ambiental proporcionan datos sobre la calidad ambiental y su impacto en la salud pública.

Solo cuando se encienden las alarmas ambientales de las ciudades y prohíben usar el vehículo (día del no carro, día del no moto, pico y placa; y pico y placa ambiental), nos percatamos de lo contaminado que puede estar el aire que respiramos.

Actualmente uno de los principales problemas de contaminación en las grandes ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Cúcuta, etc.), es la presencia de $PM_{2.5}$ y a su vez es el causante de muchas enfermedades respiratorias como Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica EPOC, enfermedades cardiovasculares, enfermedades del sistema nervioso, entre muchas otras [3].

El área metropolitana de Bucaramanga tiene una población superior a un millón de habitantes y con un parque automotor (Vehículos y motocicletas) de más de 600 mil unidades, cada vez va presentando como reporta su sistema de vigilancia de la calidad de aire dado por 5 estaciones ubicados en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón (Figura 1), que en marzo de 2020 (Figura 2) [4] aumentó en las concentraciones de material particulado, lo cual ocasionó que la categoría de la calidad del aire en la ciudad pasara de un rango moderado a dañino (Color rojo). Este sistema actualmente tiene 5 estaciones fijas con equipos costosos, pero de tecnología vigente y no se cuenta con un aplicativo para que cada ciudadano conozca la situación de calidad de aire que le permita realizar acciones preventivas.

En general se conoce que La mala calidad del aire en la capital santandereana se debe especialmente a las partículas sólidas y gases emitidos por el parque automotor y, en una proporción del 10 %, a las emisiones contaminantes del sector industrial [5-7].

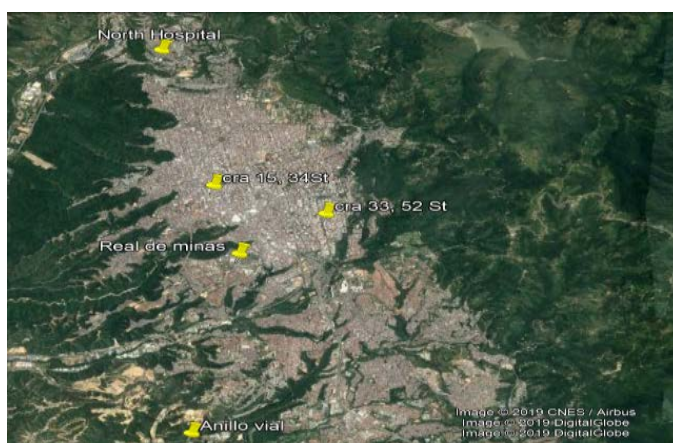


Figura 1. Localización de las 5 estaciones actuales de monitoreo de la red de calidad de aire del área metropolitana de Bucaramanga

2. MÉTODO

En la Figura 2 se presenta la aplicación sistemática de la metodología para realizar una app SIMBU para el monitoreo de $PM_{2.5}$ mediante dispositivos de bajo costo en 10 puntos estratégicos del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga.

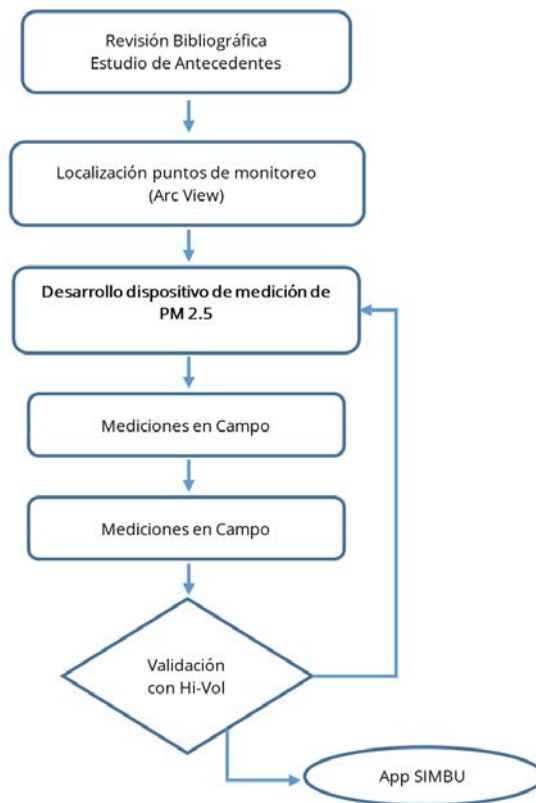


Figura 2. Metodología de desarrollo del proyecto de investigación

2.1 Diseño del estudio

El proyecto de investigación consiste en las siguientes etapas:

1. *Revisión y análisis bibliográfico.* Se realizará la búsqueda, lectura y análisis de libros, artículos científicos, revistas, trabajos de grado, páginas web y demás fuentes enfatizadas que contengan información relacionada con, sistemas de vigilancia o monitoreo de la calidad de aire PM2.5 en ciudades, además de equipos de medición de PM2.5, tanto convencionales como modernos, además de la forma de validación estadística de los resultados. También las tecnologías de fabricación de componentes electrónicos de medición de componentes ambientales en el aire. El software y el hardware de elaboración de app serán importante en la recopilación y revisión de bibliografía [8-10].
2. *Zonificación de puntos estratégicos de medición.* Se Establecerán mediante georreferenciación geográfica 10 puntos de muestreo de PM2.5. Se tendrá en cuenta el flujo del parque automotor, lugares de concentración ciudadana, zonas pobladas y no pobladas y el análisis del POT de la ciudad de Bucaramanga y de los otros municipios del área metropolitana.
3. *Diseño y elaboración de cajas de medición de PM2.5 y datos meteorológicos.* Se procederá luego al diseño de los dispositivos de medición de PM2.5 y datos meteorológicos con sensores y sistema de alimentación (Figura 3), en un bloque se tendrá una estación de medición, la caja y tendrá notación UDES (Figura 4).



Figura 3. Sistema de alimentación del Bloque



Figura 4. Caja conteniendo dispositivos

- *GPS*: El sistema de posicionamiento global GPS permite tener la ubicación exacta de la estación meteorológica, así como la sincronización temporal de los datos adquiridos para saber los momentos exactos en los cuales fueron registradas las variables climáticas. En este caso se usa un GPS-Venus.
- *Alimentación*: Este bloque se encarga de suministrar el voltaje necesario a la estación para su correcto funcionamiento. La alimentación puede provenir directamente de la toma corriente de la casa a través de un cargador de 5 Voltios. Como alternativa se puede usar una batería conectada a un panel solar, para que se recargue con la luz del Sol.
- *Raspberry Pi*: es un dispositivo electrónico que hace las veces de computador, por lo que se le conoce como *computador embebido*. Es de bajo costo y se controla mediante un sistema operativo denominado *Raspbian*.
- *Arduino*: El Arduino (Arduino Uno) permite el control de la adquisición de los datos provenientes de los sensores conectados a la estación de monitoreo, para su posterior envío a la Raspberry Pi. Cada uno de los sensores se conecta al Arduino Uno por medio de una tarjeta *shield*.
- *Comunicación WiFi*: La estación meteorológica es totalmente autónoma, para ello se estableció una conexión inalámbrica por medio de un módulo WiFi, que permite enviar los datos registrados a través de internet a un repositorio central.
- *Sensores*: Las diferentes variables climáticas como presión, temperatura, iluminancia, irradiación, humedad relativa, ruido entre otras, se registran a través de diferentes sensores, los cuales están conectados a la tarjeta Arduino Uno mediante la *shield*.

2.2 Validación de los resultados de PM2.5 obtenidos

Los datos o resultados de PM2.5, medidos por los dispositivos electrónicos de bajo costo serán validados con el equipo de medición de PM2.5 (Figura 5), comparando los datos mediante tratamiento estadístico con el software Statgraphics. El equipo para determinar el material particulado menor a 2.5 micras es el Thermo partisol 2025i, este, equipo funciona con un filtro de 47 mm, el cual después de 24 horas de toma de muestra a un flujo de 16.7 L/min es llevado a pesaje en laboratorio para calcular el material particulado recolectado, es decir, que en un día se obtendrá un solo dato o valor.



Figura 5. Thermo partisol 2025i [11, 12]

2.3 Desarrollo de la app SIMBU

Una vez el sistema de monitoreo esté implementado y las mediciones de PM_{2.5} sean validadas estadísticamente, se procede a elaborar la app SIMBU que permitirá mostrar a los ciudadanos los datos, reportes y consolidados de PM_{2.5} en tiempo real en los dispositivos móviles (Figura 6).



Figura 6. Pantalla principal del App SIMBU en desarrollo

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo de la primera fase del proyecto de investigación consiste en la creación del dispositivo para proporcionar una herramienta de bajo costo que sea capaz de medir el material particulado suspendido en el aire, para posteriormente almacenarse y transmitirse a un aplicativo de acceso libre y fácil uso [13-15].

Para lograr estos resultados es necesario diseñar un sistema completo de censado, recolección y transmisión de datos, apoyados en una plataforma de código abierto como lo es Arduino. El sensor elegido por para hacer la medición del PM_{2.5} es el módulo Pms 5003,

Según el fabricante Plantower, este sensor utiliza el principio de dispersión de la luz láser. Es decir, el láser ilumina las partículas suspendidas en el aire para generar la dispersión, y al mismo tiempo, la luz dispersada se recoge en un cierto ángulo para obtener una curva de la intensidad de la luz dispersada con el tiempo. Además, el microprocesador utiliza un algoritmo basado en la teoría MIE para obtener el tamaño de partícula equivalente de las partículas y el número de partículas de diferentes tamaños de partículas por unidad de volumen. En la Figura 7 se presenta un esquema del modo de operación del sensor

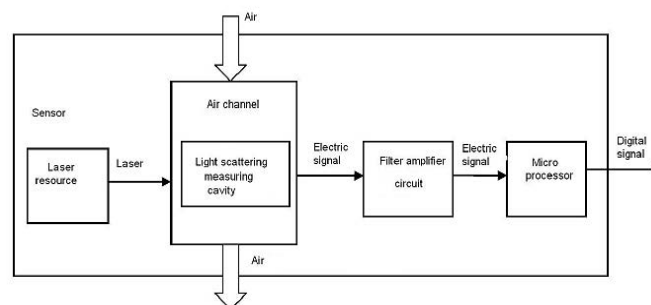


Figura 7. Diagrama funcional de bloques del sensor

De acuerdo con la Tabla 1 que también nos proporciona el fabricante Plantower, estas especificaciones son apropiadas para realizar una medición bastante aproximada de las variables de interés, entre las que se destacan el rango efectivo, la resolución, el máximo rango y una eficiencia más que aceptable para los alcances del proyecto [16, 17].

Tabla 1. Algunas especificaciones técnicas del sensor

Parámetro	Índice	Unidad de medida
Máximo rango de PM2.5	Mayor e igual de 1000	ug/m ³
Volumen estándar	0.1	Lt
Rango temperatura de trabajo	-10 +60	°C
Tamaño físico	50X38X21	mm

3.1 Esquemático del diseño del dispositivo electrónico de medición de PM2.5

Una vez seleccionado el sensor, se procedió a integrarlo con la plataforma Arduino con el fin de hacer lectura de los datos y verificar su fiabilidad, para este caso se identificaron las estaciones de medición de calidad de aire que se encuentran ubicadas en la ciudad de Bucaramanga, las cuales servirán como punto de referencia y validación de datos del sensor (Figura 8).

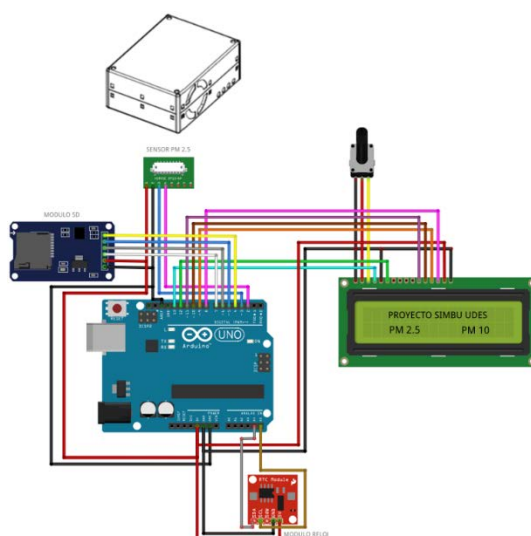


Figura 8. Diseño esquemático del circuito electrónico del dispositivo de medición de PM2.5

El circuito electrónico propuesto este compuesto por:

- *Arduino:* Microcontrolador que será programado de acuerdo a las necesidades del proyecto, incluyendo las librerías de los sensores, módulos de almacenamiento, visualización y transmisión.
- *Sensores:* se plantea usar el sensor de calidad de aire Pms 5003, aunque también plantea usar sensores complementarios como el de humedad relativa y temperatura
- *Datalogger:* Se incorpora al diseño un sistema de almacenamiento local que permita almacenar las variables aun si no se lograra hacer una transmisión remota.
- *Reloj:* Se usa un módulo RTC, que se encarga de llevar registro de fecha y hora en la que se leyeron los datos de medición
- *Módulos de transmisión:* también en el diseño está contemplado utilizar módulos de conexión inalámbrica como WIFI o bluetooth.
- *Visualización:* Alternativamente el modulo llevará un display o pantalla para lectura in situ de las variables.
- *Energía:* para garantizar largos periodos de medición, se empleará un sistema de generación de energía solar con su respectivo almacenamiento con batería y control de carga.
- *Carcasa:* Para garantizar la replicabilidad del dispositivo se realizó un diseño 3D que permite ser elaborado mediante fabricación digital por medio de impresoras 3D.

3.2 Modelo 3D

Este diseño busca integrar todos los elementos de la electrónica de una manera compacta, resistente, funcional y estética (Figura 9).

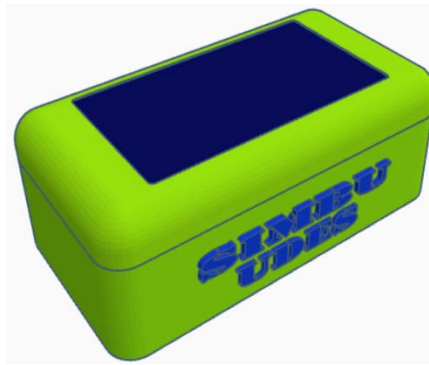


Figura 9. Modelo 3D de caja del dispositivo electrónico de medición de PM2.5

En el mismo montaje se contempla la incorporación del sistema de autogeneración de energía, mediante la instalación de un panel solar, batería y control de carga (Figura 10).

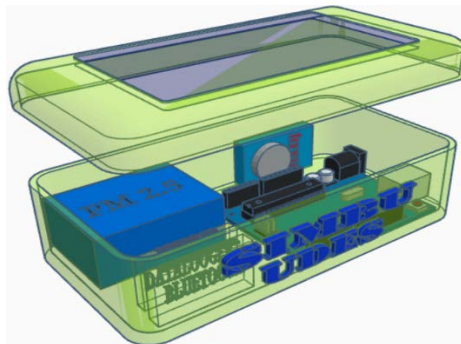


Figura 10. Ensamble de piezas dentro de la carcasa de caja del dispositivo

En la actualidad se ha desarrollado lo correspondiente a la etapa de diseño y simulación, además del modelado 3D y la verificación técnica de cada uno de los elementos incluidos, que se proponen para este diseño, la programación requerida también es un punto en el que se ha avanzado realizando las respectivas simulaciones en el software Arduino IDE 1.8.5.

4. CONCLUSIONES

Se ha avanzado en lo que concierne al diseño y desarrollo del dispositivo electrónico de bajo costo, desde su esquema, diseño 3D de carcasa y partes, y se ha iniciado en las pruebas de rangos del sensor de medición de PM2.5 y de mediciones meteorológicas.

También se ha realizado avances en el desarrollo de la app SIMBU, se ha configurado sus partes, opciones, pantalla principal y las opciones de sus ventanas.

En general se ha progresado en establecer los puntos de medición que serán los mismos establecidos por la autoridad ambiental competente del área metropolitana de Bucaramanga, que apoyará con los registros actuales de PM2.5 en equipos convencionales [18-20].

REFERENCIAS

- [1] Guido de Wilt. *Air Quality and the EU perspective until 2027*. European Commission DG Env C.3 Clean Air. Bologna. Italy. 2019.
- [2] Guido de Wilt. *Clean air for Europe- improving air quality rationale, key elements and state of play of the air package*. DG Environment, Unit C3 Air European Commission. 2015.
- [3] Marín C. *Las energías renovables en la producción de electricidad en España*. Edita: Caja Rural Regional. 2006.
- [4] Denise Mulholland U.S. *Environmental Protection Agency state and local energy and Environment Program*. (2018). Part One | the multiple benefits of energy efficiency and renewable energy. 2018.
- [5] Wuebbles D. & Sanyal S. *Air Quality in a Cleaner Energy World*. Curr. Pollution Rep. 1:117-129. 2015.

- [6] Emanuele M., Brown M. et al. "Environmental Quality and the U.S. Power Sector: air quality, water quality", land use and environmental justice. January 4, 2017.
- [7] Monforti F. et al. (2018). The Impact on air quality of energy saving measures in the major cities signatories of the covenant of mayor's initiative. *Environment International*. Vol. 118, pp. 222-234. September 2018.
- [8] Lingyun H., Zhangqi Z., Fang Y. y Deqing W. "Impact of energy consumption on air quality in Jiangsu Province of China". 2018. Recuperado: www.mdpi.com/journal/sustainability
- [9] Arroyave M. y otros. "Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. Colombia" *Forestal*, 22(1), 5-16. 2018.
- [10] Peralta H. "Contribución a las estrategias de descontaminación atmosférica, considerando el aporte de compuestos orgánicos volátiles biogénicos emitidos por especies arbóreas nativas en la Región Metropolitana". Universidad de Chile. 2009.
- [11] Pimiento E. y otros. *Servicios ambientales de la vegetación en ecosistemas urbanos en el contexto del cambio climático*. Universidad de Guadalajara México. 2012.
- [12] Coro F. et al. "Evolución del contenido de azufre en la gasolina comercializada en Galicia (España) como consecuencia de la aplicación del real decreto 1700/2003". *Información Tecnológica* vol. 20(1), 53-65. 2009.
- [13] Benavides H. y León G. *Información Técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Colombia. 2007.
- [14] Isam A. y Lamis C. "Adsorption process of sulfur removal from diesel oil using sorbent materials". *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 1, No. 1, January 2013.
- [15] Jeong W. y Navarro A. "On the removal and desorption of sulfur compounds from model fuels with modified clays". *Clean Technol.* 2018, 1, 58-69; 2018.
- [16] Peralta M. "Eliminación de contaminantes de gases de escape de motores diésel: Estabilidad de catalizadores". Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Litoral. Argentina 2012.
- [17] González J. y otros. "Catálisis, automóvil y medio ambiente". Anales de la Sociedad Española de Química. 2002.
- [18] Franco L. "Prefactibilidad Técnica y Ambiental de tres tecnologías representativas de generación de energía eléctrica en América Latina". Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 2015.
- [19] Escobar R. y otros. *El uso de la energía en los procesos productivos en el área rural. Proyecto Energía, Desarrollo y Vida - endev/giz*. Lima. 2013.
- [20] Revah S., Pérez F. y Auria R. "Generalidades sobre procesos de purificación biológica de gases de compuestos orgánicos industriales" 1: 17-22 o Instituto de Ingeniería, UNAM México, D.F. 2006.

Incidencia de la movilidad de las personas en la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en una zona residencial urbana

Ángel Alejandro Rodríguez-Aya¹

John Alejandro Figueredo-Luna²

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Colombia

En este capítulo se presenta los datos recolectados de la investigación *Sistema de monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ en el aire, aplicando herramientas IoT en el municipio de Villavicencio y Acacias*. Realizado entre la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, CEAD Acacias, y la Corporación Autónoma de Nariño, extensión Villavicencio. Se pretende mostrar la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en un punto de la ciudad de Villavicencio, Colombia, en la ventana de observación de junio 2020 a junio 2021, teniendo en cuenta los datos a partir de las decisiones y políticas por el Covid-19 en 2020 y el paro nacional de abril 2021. Los resultados muestran variaciones significativas de hasta un 88% de la concentración promedio de material particulado $PM_{2.5}$, cuando se adopta alguna política o medida social que afecta la movilidad de las personas en vehículos de combustión interna.

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Alta Gerencia y Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

Contacto: angel.rodriguez@unad.edu.co

² Ingeniero de Sistemas, Especialista en Diseño y Construcción de Soluciones Telemáticas y Magíster en Educación en Línea.

Contacto: john.figueredo@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico y la evolución de sistemas electrónicos embebidos han permitido el desarrollo de sistemas de medición de bajo costo, tanto energético, computacional y económico, lo que ha generado la formulación y desarrollo de diferentes proyectos en el área de electrónica y ser aplicados en diferentes contextos o problemáticas que hace un tiempo atrás era costoso de desarrollar, esta investigación se basa en la aplicación de sistemas embebidos de bajo costo compatibles con Arduino y la integración de herramientas IoT [1, 2] (tanto en Hardware como Software), para la medición del material particulado $PM_{2.5}$ que se encuentra presente en el aire en una zona residencial del municipio de Villavicencio.

Los resultados que se evidencian en esta publicación parte de la investigación titulada "Sistema de monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ en el aire, aplicando herramientas IoT en el municipio de Villavicencio y Acacias" realizada en la UNAD en conjunto con la Corporación Autónoma de Nariño sede Villavicencio, la cual tiene como finalidad medir los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ en el aire y determinar si en algunos puntos de la ciudad de Villavicencio se sobrepasa los niveles mínimos establecidos por la Organización Mundial de la Salud OMS y por el Índice de la calidad del Aire ICA, en aras de hacer un monitoreo constante y poder generar un reporte a las entidades gubernamentales locales con el fin de prevenir enfermedades derivadas al inhalar material $PM_{2.5}$.

Los resultados de la medición de material particulado, tiene sus orígenes en [3], donde se mostró el desarrollo del prototipo funcional para la captura de datos a través de IoT, utilizando una tarjeta Wemos D1 Mini, un sensor PMS5003 como hardware principal y la plataforma Thingspeak como receptora de los datos aplicando IoT, para su publicación y posterior análisis, demostrando la funcionalidad del prototipo y las ventajas de aplicación.

Adicionalmente, en diciembre del mismo año se realizó la publicación de [4], donde se realizó una comparación del material particulado $PM_{2.5}$ presente en el aire en dos puntos distintos de la ciudad, en una zona residencial y en una zona no residencial, en la cual se realizó la comparativa de los datos de los últimos 6 meses, adicionalmente se hicieron comparaciones de variables en [5], para corroborar el método con el que se recolectó la información, por otro lado, se analiza el histórico obtenido de $PM_{2.5}$ en [6, 7], para revisar la correlación de datos entre las mediciones obtenidas.

En la actualidad y teniendo como base las publicaciones mencionadas anteriormente, se pretende mostrar los resultados obtenidos de la medición de material particulado $PM_{2.5}$ en la una sola zona, que en este caso es la zona residencial en el último año de medición de la estación de medición, el cual comprende el periodo de junio de 2020 a junio de 2021, teniendo una ventana de observación cercana a un año.

Adicionalmente, los resultados de las mediciones se analizarán desde las medidas vividas y adoptadas por el gobierno Colombiano en cuanto a la emergencia sanitaria provocada por el Covid-19, como lo fue el aislamiento preventivo obligatorio del año 2020, la nueva reactivación económica de 2020 y, finalmente, la situación adversa provocada por el paro nacional en Colombia convocado por diversos sectores el 28 de abril de 2021, en el cual se podrá observar todas las posibles variaciones de las mediciones provocadas por los acontecimientos mencionados anteriormente.

Actualmente, en Colombia el estándar de establecido para la medición de la calidad del aire se tiene como referencia el Índice de Calidad del Aire ICA (Figura 1), el cual corresponde a un valor adimensional en escala numérica y por colores, que va desde una escala buena color verde con un valor de 0 a 50 y termina en peligrosa en color marrón con un valor de 401 a 500 [8].

Vale la pena resaltar que la escala es la ponderación y suma de partículas presentes en el aire, tales como O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO , SO_2 , y NO_2 , y para este efecto de análisis de este trabajo se tendrá en cuenta la escala de $PM_{2.5}$ y que, para la normatividad colombiana, se establece que para una concentración mayor de $37\mu g/m^3$ puede provocar afectaciones para la salud humana, como por ejemplo enfermedades pulmonares y en algunos casos problemas al corazón.

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm (1)	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50	Verde	Buena	0,000 - 0,059	-	0 - 54	0,0 - 15,4	0,0 - 4,4	0,000 - 0,034	(2)
51 - 100	Amarillo	Moderada	0,060 - 0,075	-	55 - 154	15,5 - 40,4	4,5 - 9,4	0,035 - 0,144	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 - 0,095	0,125 - 0,164	155 - 254	40,5 - 65,4	9,5 - 12,4	0,145 - 0,224	(2)
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 - 0,115	0,165 - 0,204	255 - 354	65,5 - 150,4	12,5 - 15,4	0,225 - 0,304	(2)
201 - 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0,116 - 0,374 (0,155 - 0,404) (4)	0,205 - 0,404	355 - 424	150,5 - 250,4	15,5 - 30,4	0,305 - 0,604	0,65 - 1,24
301 - 400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 - 0,504	425 - 504	250,5 - 350,4	30,5 - 40,4	0,605 - 0,804	1,25 - 1,64
401 - 500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 - 0,604	505 - 604	350,5 - 500,4	40,5 - 50,4	0,805 - 1,004	1,65 - 2,04

Figura 1. Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire ICA en Colombia

2. MÉTODO

2.1 Ubicación de la estación

La estación de medición de material particulado PM_{2.5} esta ubicada en una zona residencial de la ciudad de Villavicencio, para ser más específico, en la ubicación geoespacial 4.113959, -73.641648 (Figura 2), en la cual se han realizado las medidas por el prototipo de medición y que se puede apreciar su diagrama de bloques en la Figura 3, desde el mes de junio de 2020 hasta el mes de junio de 2021.



Figura 1. Ubicación geoespacial estación 2 Hacienda Rosablanca

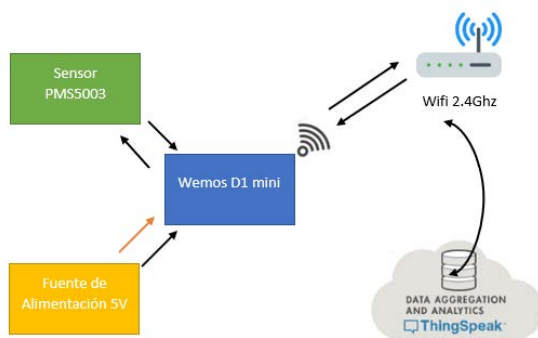


Figura 2. Diagrama de bloques de la estación de medición de PM_{2.5}

2.2 Hardware

Los materiales implementados para la construcción del prototipo de estación de material particulado PM_{2.5}, en su hardware de procesamiento se implementó el sistema embebido conocido como Wemos D1 mini (Figura 4), el cual es una tarjeta basada en un microcontrolador ESP8266 que es capaz de conectarse a internet a través de Wifi con redes de 2.4 GHz [9], uno de los hardware compatibles con Arduino más económicos del mercado para aplicar IoT, por otra parte, se tiene el sensor PMS5003 (Figura 5) el cual tiene la capacidad de medir material particulado PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ en concentraciones de µg/m³ con una eficiencia de conteo del 98% [10].



Figura 3. Tarjeta para IoT Wemos D1 mini



Figura 4. Sensor PMS5003

2.3 Software

El software implementado para la programación del hardware y la medición de las lecturas del sensor PMS5003 se implementó en el IDE de Arduino [11], con la ayuda del Gestor de URLs Adicionales de Tarjetas ESP8266, para que se logre hacer la programación directamente desde el IDE de Arduino para la tarjeta Wemos De1 mini, por otra parte, para la recepción de los datos a internet se implementó la aplicación web Thingspeak [12], actualmente es gestionada por MathWorks y se utiliza para realizar aplicaciones de IoT, tanto en la academia como en la industria.

2.4 Metodología

La metodología que se ha trabajado a lo largo de esta investigación es la metodología experimental, muy utilizada en el área de ingeniería, puesto que consiste en que los investigadores controlan las variables que intervienen en el proyecto con el fin de analizar y delimitar cada una de ellas, con la finalidad de solucionar un problema. Adicionalmente, se ha sumado a esta metodología el método cascada retroalimentada [13] para el diseño de software, este método permite mejorar el sistema a través de iteraciones se comprueba funcionamiento, lo anterior validando la operatividad en cada iteración y así ir depurando los posibles errores que se puedan presentar, en la Figura 6 se puede apreciar el esquema de este método.

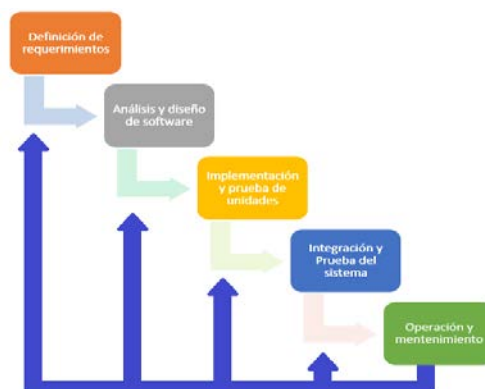


Figura 5. Método Cascada Retroalimentada

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la ventana de observación para el periodo comprendido entre junio 2020 a junio 2021 de la concentración de material particulado PM_{2.5} promedio por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se pueden apreciar en la

Figura 7, en donde se realizaron mediciones del segundo semestre del año 2020 y primer semestre del año 2021, evidenciando un aumento en la concentración de material particulado PM_{2.5} entre ambos periodos.

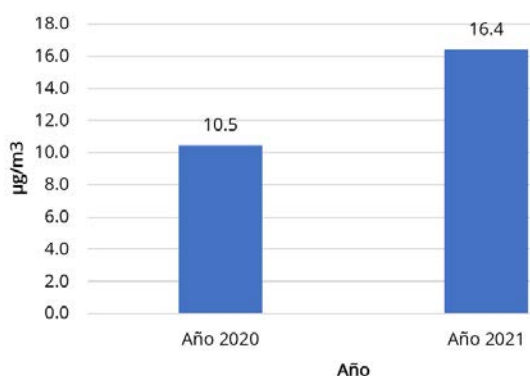


Figura 6. Concentración de material particulado PM_{2.5} por año

La concentración del material particulado PM_{2.5} por mes para el año 2020 se puede apreciar en la Figura 8, en donde existen variaciones significativas del material particulado mes a mes durante el periodo analizado, en donde el tiempo de muestreo de cada uno de los datos es de 2 minutos entre cada medición.

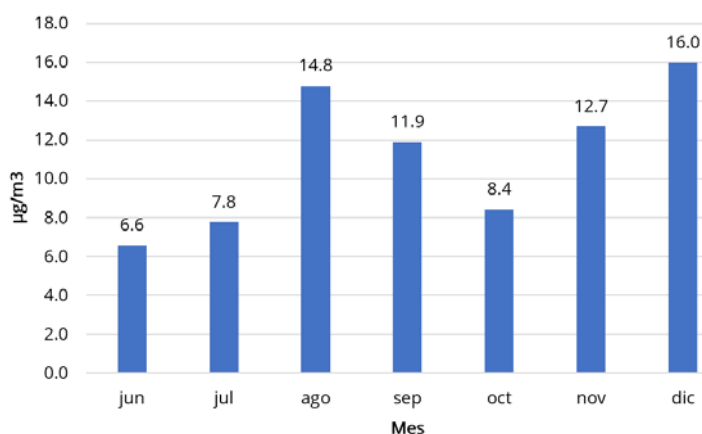


Figura 7. Concentración de material particulado PM_{2.5} por mes año 2020

La concentración del material particulado PM_{2.5} por mes para el año 2021 se puede apreciar en la Figura 9, en donde existe una tendencia de incremento en el primer trimestre del año en el periodo analizado, para este caso, también el tiempo de muestreo de cada uno de los datos es de 2 minutos entre cada medición.

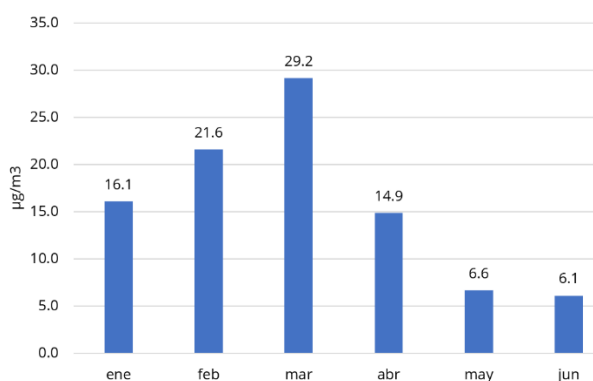


Figura 8. Concentración de material particulado PM_{2.5} por mes año 2021

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La concentración del material particulado PM_{2.5} promedio para el año 2020 tuvo una concentración menor en comparativa con el año 2021, lo anterior de acuerdo a los sucesos vividos durante el segundo semestre del año 2020, lo anterior teniendo en cuenta que el país estaba en aislamiento preventivo obligatorio por el Covid-19 en el tercer trimestre del año y para el cuarto trimestre del año se encontraba en lo que se

denominó la reactivación económica, pero con restricciones a la movilidad y algunos sectores productivos no estaban autorizados a abrir, por tal razón se presentó una disminución de la concentración promedio de PM_{2.5} de 10.5 µg/m³ en el 2020 a un incremento de 16.4 µg/m³ para el año 2021.

Para el año 2020, en la concentración mes a mes que se puede evidenciar en la Figura 8, se observa que la concentración promedio de PM_{2.5} registrada tenía índices muy bajos, como lo fue el mes de junio y julio, en el cual se presentó debido a la baja movilidad de personas y a su vez de vehículos particulares y de servicio público debido al aislamiento preventivo obligatorio, dicha concentración fue menor a 8 µg/m³, presentándose un incremento para los meses de agosto y septiembre por las flexibilizaciones parciales a la movilidad y luego para los meses de Noviembre y diciembre se presenta una tendencia de incremento de la concentración de material particulado llegando a un máximo de 16 µg/m³ para diciembre de 2020.

Al inicio del año 2021, se continuó con la tendencia de incremento promedio de PM_{2.5} pasando en el mes de enero de 16.1 µg/m³ a 29.2 µg/m³ hasta el mes de marzo, luego se presenta una tendencia a la disminución de material particulado PM_{2.5} bajando desde el mes de abril a 14.9 µg/m³ y luego manteniéndose por debajo de 7 µg/m³ para los meses de mayo y junio, lo anterior se debe a que en el mes de abril se rompió la tendencia al alza debido al paro nacional que se convocó para el mes de abril por diferentes sectores del país lo que provocó cierres en las vías, disminución en la movilidad y miedo de las personas a salir de sus casas por las dificultades que se presentaron en las tres primeras semanas del paro.

5. CONCLUSIONES

Las actividades diarias de los humanos provocan cambios en los patrones de contaminación atmosférica y en la calidad del aire que respiramos, lo anterior teniendo en cuenta que a la fecha la mayoría de los sistemas de transporte se basan en motores de combustión, máquinas ineficientes y emisores de diferentes gases y material particulado como el PM_{2.5}, provocando enfermedades sobre los mismos seres humanos y fauna cercana a las fuertes fuentes y concentraciones de dicho material.

Las diferentes decisiones que se tomen en cualquier gobierno sean políticas, económicas y/o de salud, impactan directamente sobre diferentes variables que se pueden presentar en alguna localidad, municipio o territorio, lo anterior se evidencia en la variación de la concentración de material particulado PM_{2.5} por la interrupción a la movilidad de las personas, ya sea por situaciones adversas como la emergencia provocada por el Covid-19, o en su caso protestas sociales que indirectamente afectan la movilidad y hacen que se disminuya la movilidad vehicular por parte de las personas, lo que genera el uso de transporte menos contaminantes como fueron la bicicleta e incluso caminar.

Para finalizar, es importante que desde la conciencia individual, se piense en adoptar nuevas tecnologías para la movilidad que sean amigables con el medio ambiente, como autos híbridos, eléctricos y otras tecnologías futuras que puedan utilizarse para este fin, para cumplir esto existe un costo económico alto, pero dicho costo será mucho más económico que curar enfermedades derivadas por el PM_{2.5} y afectaciones al medio ambiente que en algunos casos pueden ser irreparable o pasar décadas para su recuperación.

REFERENCIAS

- [1] C. Caleño y J. Parra, «Desarrollo de prototipo IoT escalable con mínima programación de usuario para diferentes aplicaciones», *Innvestiga*, pp. 8-11, 2018.
- [2] C. A. Beltrán Encio, J. A. Chica García, y J. Cifuentes, «Influence of man on the meteorological conditions of the CORONCORO wetlands located in the city of Villavicencio using multiparameter datalogger and IoT technology», en *2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI)*, nov. 2018, pp. 1-5.
- [3] «Diseño y desarrollo de un prototipo para la medición de material particulado PM_{2.5} utilizando herramientas IoT», en *Desarrollo e Innovación en Ingeniería (ed. 5)*, Zenodo, 2020.
- [4] A. Rodríguez, J. Figueredo, M. del P. Wilches, J. Chica, y C. Beltrán, «Análisis de emisiones de material particulado pm_{2.5} en el aislamiento preventivo obligatorio por el Covid-19 - 2020, en dos puntos de municipio de Villavicencio - Meta - Colombia», en *Ciencia y Tecnología: Pilar del Desarrollo de la Sociedad Moderna*, Editorial Fundación LASIRC, 2020.

- [5] V. Javiez, A. Jeison, A. Mateo, C. Jairo, E. Hernández, y I. Lauren, «Analysis of Co, Co2 and No2 Air Pollutants in the City of Villavicencio - Colombia», *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, n.º 3, p. 490, mar. 2020
- [6] L. G. I. Domínguez, E. J. H. Alonso, J. A. C. Guarnizo, J. A. Carrillo, y J. A. V. Guativa, «Monitoreo de material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Villavicencio», en *2019 Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASP)*, ago. 2019, pp. 1-5.
- [7] «CIFCOM2019-Memorias-20.pdf». Accedido: jun. 22, 2021.
- [8] «Indice_Calidad_del_Aire.pdf». Accedido: jun. 22, 2021.
- [9] «LOLIN D1 mini — WEMOS documentation». Recuperado: https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html
- [10] «PMS5003 Series Manual Datasheet by Adafruit Industries LLC | Digi-Key Electronics». Recuperado: <https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2903006/0/0/1/pms5003-series-manual.html>
- [11] «Software». Recuperado: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [12] «IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things». Recuperado: <https://thingspeak.com/>
- [13] E. Ranchal Tomás, «Estudio e implantación de un sistema ERP en una empresa», sep. 2016.

Determinación de la energía geotérmica hidrotermal y los impactos ambientales en el departamento de Caldas, Colombia

Tatiana Pérez Gosteva¹
Mariana Sabogal Correa²
Juan Pablo Vaquiro Ramírez³
Universidad La Gran Colombia
Colombia

La demanda energética en Colombia se suple principalmente mediante fuentes convencionales de energía, que impactan el ambiente. Es por esto que la implementación de energías alternativas, como la geotérmica, podrían disminuir las emisiones liberadas y proporcionar un beneficio a largo para el país; sin embargo, su instalación también afecta el ecosistema, por lo que es necesario estimarlos y buscar posibles soluciones con el fin de conservar su aspecto sustentable y renovable. Como objetivo, en este trabajo se planteó determinar la importancia de esta energía y sus impactos en el departamento de Caldas, Colombia. La metodología empleada fue de tipo exploratorio-evaluativo por medio de un método empírico-analítico; se realizó una descripción del fenómeno estudiado a partir de los datos recolectados. A partir de lo mencionado, se encontró que el análisis de variables físicas para este tipo de energía permite codificar la información de los sistemas según su yacimiento y su nivel de entalpía, teniendo en cuenta el impacto ambiental que pueda generar a largo plazo; por lo tanto, se estudiaron estrategias de mitigación tales como la matriz de Leopold, que se basa principalmente en la causa-efecto que se pueda originar al momento de extraer cualquier tipo de energía. Finalmente, con esta información se encontró que a partir de las variables fisicoquímicas se puede determinar la cantidad de energía que suministra un hidrotermal y su clasificación dependiendo de la temperatura, además, junto con las metodologías de prevención y conservación ambiental, se observó que pueden existir otras alternativas para disminuir el impacto ambiental al momento de extraer esta energía gracias a los sistemas de información geográfica SIG, generando cartografía temática que permita generar un equilibrio entre ambiente y energía.

¹ Ingeniera electrónica, Magíster en Gestión de la prevención de riesgos laborales, la excelencia, el medio ambiente y la responsabilidad corporativa.

Contacto: perezgostatiana@miugca.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Geográfica y Ambiental.

Contacto: sabogalcormariana@miugca.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería Geográfica y Ambiental.

Contacto: vaquiroramjuan@miugca.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de recursos inagotables, los cuales pueden permanecer a lo largo del tiempo gracias a que pueden regenerarse por sí mismos. Entre ellas se encuentra la energía geotérmica, como aquella que, aprovechando el calor que se extrae de la corteza terrestre, se transforma en energía eléctrica o en calor para uso humano o procesos industriales o agrícolas [1].

Su uso, puede llegar a generar grandes beneficios en países como Colombia, debido a que existe aún una gran dependencia de las energías convencionales, las cuales, a pesar de traer consigo cierto avance, provocan impactos negativos en la atmósfera por sus emisiones y cambios en los ecosistemas que, a largo plazo, implicarán una inversión en la búsqueda para su solución. De acuerdo con [2], *aproximadamente el 70% del potencial energético del país proviene de las hidroeléctricas, 29% proviene del combustible fósil (carbón, diesel, gasolina y gas natural), y el 1% proviene de otras fuentes (biomasa, energía eólica y solar).*

En concordancia, el país cuenta con una ubicación geográfica y características geológicas importantes que permiten la obtención de este tipo de energía, de modo que *la actividad volcánica en Colombia es generada por la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana* [2] y se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, *zona donde el gradiente geotérmico es anómalamente alto* [3]. Así mismo, es preciso tener en cuenta que el aumento de la población implica la demanda de una mayor cantidad de recursos para suplir las necesidades de la población, viéndose una vez más expuesta la importancia que tiene el buscar alternativas energéticas a las ya empleadas.

Sin embargo, su extracción y aplicación, como toda fuente de energía verde, implica una serie de condiciones para que cumpla con este aspecto; es decir, que hay que tener presente su sustentabilidad y carácter renovable [4] afirma que *con respecto a la energía geotérmica, la sustentabilidad significa la capacidad del sistema geotérmico de producir vapor para mantener los niveles de producción durante largos períodos (de cientos de años) y para considerar el recurso geotérmico como fuente renovable de energía, la extracción no debe superar nunca la recarga natural de agua en el acuífero*, haciendo referencia tanto al manejo que se le realice, como a la naturaleza en sí del recurso, respectivamente.

No obstante, su extracción además requiere de cierto proceso posterior con el fin de determinar las zonas en las que tiene relevancia llevarla a cabo; es allí donde la exploración cumple un papel fundamental para determinar el desarrollo de un proyecto geotérmico.

Entre las fases estudiadas inicialmente, es preciso tener presente el impacto que se le genera a la zona de trabajo y los ecosistemas aledaños durante la estabilización de una planta geotérmica, debido a que ese es un factor que influye en su utilización además de si son reversibles o no los daños que se le provoque. [4] plantea que entre los posibles efectos ambientales presentes se encuentran: la subsidencia del terreno y sismicidad; el ruido; emisiones a la atmósfera; contaminación de aguas superficiales y subterráneas; cambios en el paisaje y el uso del suelo; residuos sólidos y en la ecología.

Así mismo, *las emisiones geotérmicas contribuyen a la manifestación de condiciones de estrés en la vegetación forestal circundante* [5], el impacto visual es evidente en zonas donde se puede interrumpir la armonía del paisaje y en el aspecto social; [4] menciona al respecto que el desarrollo de un diagnóstico sociocultural de la zona aumentará las probabilidades de éxito del proyecto, al contar con información estratégica de primera mano sobre los aspectos sociales, culturales, productivos e inclusive ambientales de la comunidad en cuestión y de sus pobladores

Este trabajo se plantea, teniendo como punto de partida, la extracción de energía en Colombia principalmente de fuentes como las hidroeléctricas y la quema de combustibles fósiles las cuales han traído consigo el agravamiento de fenómenos como el cambio climático. Sin embargo, como respuesta a estos acontecimientos, se encuentra la energía solar y eólica; no obstante, estas dependen de ciertas condiciones meteorológicas que influyen en su funcionamiento. Por consiguiente, la energía geotérmica es una opción que contribuye a dar solución debido a su característica renovable y sustentable, además de que la temperatura el interior de la corteza permanece a lo largo del tiempo; su desarrollo permite cumplir con la

demanda referida al constante aumento de la población, ya que de acuerdo a [6] *la demanda energética es directamente proporcional al crecimiento demográfico, lo que conlleva a la búsqueda de otras fuentes de generación energética no convencional dadas las altas demandas.*

En su desarrollo, como cualquier cambio que se produce en un medio natural, *cualquier tipo de producción de energía tendrá algún impacto en el ambiente, pero el grado o magnitud de este impacto dependerá de la tecnología utilizada y la gestión de los residuos* [4], los cuales deben ser los mínimos posibles y con el objetivo de que en cuanto esté en funcionamiento la planta, no siga provocando daños al entorno, con el fin de conservar su procesamiento lo más limpio posible. Por lo tanto, el proceso de exploración de zonas en las que haya presencia geotermal apta para su explotación en el país, como aún no ha sido formalizado ningún proyecto, requiere de estudios que involucren disciplinas como la geofísica y geología, permitiendo obtener aspectos importantes a considerar, como el mencionado por [6] acerca que, de acuerdo con el reservorio geotérmico que se presente, se determina el tipo de planta geotérmica de generación de electricidad, característica que es determinante, en términos de temperatura presente, presión del fluido y cuál es la fase predominante (fase líquida o vapor).

En congruencia, para el cumplimiento de las condiciones necesarias para el procesamiento de una planta geotérmica, se hace relevante el conocimiento por parte de la población tanto de los beneficios a largo plazo que puede traer esta producción de energía, como del proceso y los cambios a ejecutar en la zona de trabajo; además, la obtención de licencias ambientales, las cuales simultáneamente, regulen y monitoreen el alcance de las transformaciones que se lleven a cabo; asimismo, el uso de infraestructura especializada que esté dirigida a la disminución de los impactos generados, como la emisión de desechos, el impacto visual y la modificación del ecosistema empleado.

Por tanto, la evaluación de su implementación en áreas protegidas debe ser aún más rigurosa y estar regidas por una reglamentación clara frente a la influencia que puede generarse, en qué medida y tanto el tiempo como las condiciones necesarias para su recuperación. *Precisamente el tener un diagnóstico de las interacciones y su causa y efecto en forma precisa hace que se pueda estructurar planes que permitan mitigar esos impactos* [7]. Es por esto que la determinación de la importancia de esta energía y sus impactos en Caldas es necesaria para su implementación, con el fin de evaluar los cambios generados en la zona y la búsqueda de posibles soluciones a estos, teniendo en cuenta que posee las condiciones necesarias para su funcionamiento.

Con base a lo mencionado este trabajo tiene como enfoque identificar las variables de los hidrotermales que permitan el uso de la energía geotérmica a nivel local, por otra parte, también se plantea analizar los tipos de impactos ambientales que se pueden generar a partir de este tipo de energía con el fin de resguardar y proteger la fauna y flora que se encuentra en esta área de estudio y por último se tiene establecer los parámetros básicos para el aprovechamiento de esta energía.

Dentro de este marco se debe de entender que la energía geotérmica cuenta con características fisicoquímicas que permiten la obtención de energía por medio de diferentes aspectos o particularidades de las zonas que la producen, cabe mencionar que este tipo de energía según [8] es definida como una fuente de energía alternativa proveniente del calor térmico que se encuentra en las capas internas de la corteza terrestre, sin embargo, esta se puede ver reflejada en parámetros superficiales, tales como los géiseres, fumarolas y manantiales, entre otras características particulares.

Por medio de esto, diversos autores han planteado que este tipo de energía permite el manejo y la construcción de un desarrollo sostenible, sin embargo, esta debe de tener requisitos para poder implementarse en un lugar determinado, uno de los más importantes es la identificación de complejos volcánicos, los cuales son la fuente principal de esta energía, porque a partir de este se pueden realizar extracciones y cuenta con los parámetros necesarios para producirla.

En este orden de ideas, el territorio colombiano se encuentra en una de las franjas con mayor actividad sísmica y volcánica llamada el Cinturón de fuego del Pacífico, donde permite contar con una gran cantidad de complejos volcánicos en su territorio. A partir de lo mencionado, Colombia tiene gran impacto para dicha

implementación por su gran cantidad de volcanes y debido a esto cuenta con afluentes hídricos los cuales contienen calor emanado de interior volcánico llamados hidrotermales, donde estos se caracterizan por su temperatura elevada siendo mayor a la temperatura ambiente, según [9] enuncian que *el agua de un manantial térmico puede ser meteórica, lo que significa que proviene de la superficie terrestre tales como ríos, lagos, entre otros y de igual forma pueden ser magmáticas, la cual libera agua con otros fluidos volátiles.*

Esto quiere decir que también por medio de altos gradientes térmicos se presentan manantiales termales que también permite la captura de esta energía no convencional. El agua en los sistemas mencionados es de composición química muy diversa y podría alcanzar en el reservorio, a profundidad, temperaturas entre 100°C y 280°C. Se ha deducido que los sistemas que posiblemente tienen una mayor temperatura en el reservorio. La localización de la gran mayoría de manantiales termales indica su relación con los sistemas geotérmicos de agua caliente, asociados a volcanes, tal como lo enuncia [10].

Sin embargo, también se deben tener en cuenta los impactos ecosistémicos y ambientales que puedan producirse de su extracción y utilización de esta energía no convencional, siguiendo la reglamentación institucional y constitucional de la república, lo que conlleva a tener en cuenta a [11], formalizando la ley 1665 de 2013 donde se vincula el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables, la cual promueve el uso de estas energías gracias a las oportunidades de acceso que podría ofrecer en países en desarrollo y mostrar las consecuencias negativas que se pueden dar el uso de combustibles fósiles.

Por otra parte, en este marco jurídico se tiene a [12] empleando la ley 2811 de 1974 el cual se refiere el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, promulgado por el Ministerio de Ambiente considera los artículos respecto a energías renovables y energía geotérmica, teniendo en cuenta el Artículo 167, donde se identifican los recursos energéticos primarios tales como: energía solar, energía eólica, recursos geotérmicos y energía contenida en el mar, además la ley 99 de 1993 toma en cuenta la organización y el reordenamiento de los sectores públicos que permitan realizar una gestión y priorización del medio ambiente y de los recursos naturales y, finalmente, junto con [13] donde esta se encarga de realizar un regulación integral de las energías no convencionales en los sistemas energéticos nacionales, teniendo como base el artículo 21 el cual habla de un desarrollo a partir de la energía geotérmica, teniendo en cuenta las áreas de estudio y los análisis para un reglamentación jurídica óptima, también evaluando el tipo de potencial que se pueda adquirir de la misma y finalmente con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, determinar los parámetros ambientales que se deban de cumplir en estos proyectos de energía geotérmica.

Con base a la reglamentación jurídica, se debe tener en cuenta el área de estudio para determinar la viabilidad y los impactos ambientales que pueda genera la energía geotérmica, por medio de esto, a continuación, se muestra la Figura 1, en la cual subyace la cartografía de localización del área de estudio.

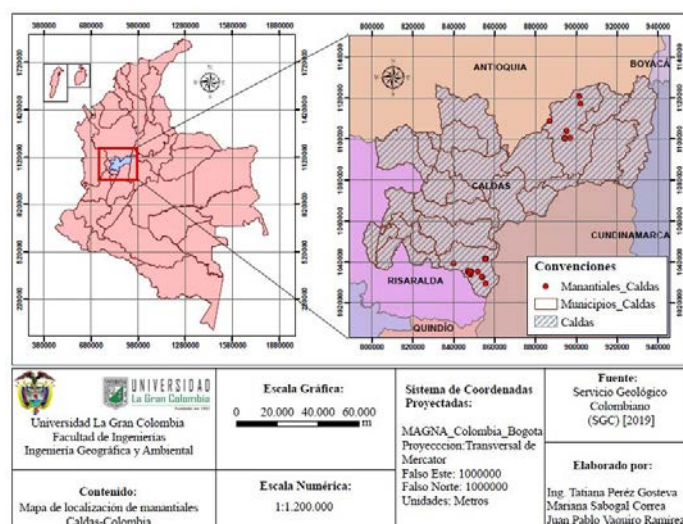


Figura. 1: Mapa de localización de manantiales Caldas, Colombia

Con base a lo ilustrado en la Figura 1, según [14] el departamento de Caldas se encuentra en el centro occidente de la región andina, localizado entre una latitud norte de 05°46'51" y los 04°48'20" y con un longitud hacia el oeste de 74°38'01" y los 75°55'45" teniendo una superficies de 7888 km², también presenta límites en los diferentes puntos cardinales del mismo, teniendo presente a Antioquia el cual limita el norte del departamento, por otra parte, cuenta con el departamento Boyacá en un pequeña proporción al noreste de mismo; de igual modo está el departamento de Cundinamarca, el cual se encuentra al este de Caldas, finalmente se encuentra también el departamento de Tolima y Risaralda, tomando en cuenta que el primero se encuentra al sureste y Risaralda cuenta límites al suroeste y oeste del departamento de Caldas.

Por otra parte, es necesario comprender que el flujo térmico de la corteza se encuentra en cualquier punto del planeta, sin embargo, es importante aclarar que existen más posibilidades de extracción de esta energía, en lugares donde se encuentre alta actividad volcánica o sísmica; en las imágenes encontradas a continuación se observan algunas de las zonas de gradiente térmico, según su simbología, además de la Producción de calor, potencia instalada tal como se muestra en la Figura 2 y Figura 3.



Figura 2. Zonas de gradiente térmico según su simbología



Figura 3. Producción de calor, potencia instalada

2. MÉTODO

El método de la investigación planteada es empírico- analítico, estableciendo los parámetros necesarios que permiten desarrollar una descripción del fenómeno estudiado a partir de los datos recolectados, los cuales brindan el soporte para el correcto análisis de la relación de la energía geotérmica con los impactos ambientales en la región de estudio. Asimismo, el enfoque es mixto, debido a la relación que se presenta entre las leyes de la termodinámica y los impactos ambientales generados por este tipo de energía. Finalmente, el tipo de investigación planteado es exploratorio- evaluativo dadas las características de la investigación planteada, debido a que este tipo de investigación permite la generación de nuevos ámbitos para la exploración de energías renovables en diferentes zonas del país.

Por lo tanto, para el desarrollo de esta, se plantea la realización de 3 fases, mediante las cuales se identifican las variables, se analizan los impactos ambientales y se establecen los parámetros básicos para el aprovechamiento de esta energía.

2.1 Fase 1

En el proceso de identificación de variables, se debe tener presente las leyes termodinámicas que permiten el análisis de los elementos que producen variaciones por los cambios de temperatura, además de permitir la interpretación de las condiciones precisas para este tipo de energía. En adición a lo anterior, se tiene [15] que, entre las propiedades termodinámicas aplicadas a reservorios geotérmicos y acuíferos, la ecuación de estado, la primera ley de la termodinámica y la entalpía específica, permiten representar la relación del cambio de la energía interna y el trabajo. Del mismo modo, para la determinación de la energía geotérmica a partir de hidrotermales se tiene una caracterización de las aguas termales, [16] mediante la Tabla 1, se identifica la clasificación de las aguas termales según su temperatura.

Tabla 1. Clasificación según temperatura de aguas termales [16]

Aguas termales	Temperatura
Super - Termales	>100° C
Hiper - Termales	45°C a 100°C
Meso - Termales	35°C a 45°C
Hipo - Termales	20°C a 35°C

Dado lo anterior, se identifican las variables que permiten establecer según la temperatura de las aguas termales el uso adecuado de estos, es decir, en algunos casos se genera la transformación en energía eléctrica y en otros casos se usa esta energía para otras funciones. Teniendo en cuenta que las aguas termales se dividen según sus características, se denota en la Tabla 2, sus propiedades.

Tabla 2. Usos de la energía geotérmica a partir de la temperatura dada

Temperatura	Uso
> 150°C	Energía eléctrica a partir de vapor de agua
90°C a 150°C	Energía eléctrica usando un fluido de intercambio
30°C a 90°C	Calefacción de edificios y algunos procesos industriales
< 30°C	Calefacción y climatización

Asimismo, es importante identificar los elementos presentados en fluidos termales, dado que denotan el tipo de fuente que se utiliza, las características y sus componentes. Con base en [17]. Los fluidos se dividen en primarios, los cuales se encuentran a su vez conformados por Aguas cloruradas (Tienen un alto porcentaje de sales en disolución que corresponde a Na-Cl), Aguas sulfato - ácidas (Relacionadas con volcanes andesíticos) y Salmueras. Los fluidos secundarios se encuentran formados por Aguas sulfato-ácidas vapor calentadas, Aguas carbonatadas y Aguas Mezcladas.

2.2 Fase 2

Es importante mencionar que aunque esta energía es de carácter no convencional, lo que quiere decir que no es común y puede ser catalogada como energía verde, también puede presentar problemática en el ambiente, dado que cualquier modelo de obtención de energía por medio de recursos indeterminados, genera un codificación y modificación en el ambiente donde se extrae la misma, generando así una serie de alteraciones ecológicas, que de algún modo se deben disminuir para que no exista un desequilibrio en el ecosistema e incluso se pueda generar una correlación entre las factores antrópicos y los factores ambientales. Cada planeación y construcción de centrales eléctricas tendrán una consecuencia en la zona donde se emplee y es importante aclarar que no solo se ve afectado el ambiente, sino que también al tener zonas aledañas cerca de las misma, puede generar perturbaciones a la misma población.

Es importante determinar qué factores en las plantas de producción de energía geotérmica desarrollan alteración tanto a nivel ambiental como a nivel antrópico, tal como lo enuncia [18] donde los recursos geotérmicos pueden estar ubicados en áreas protegidas donde el desarrollo y la explotación de los recursos pueden resultar en efectos ecológicos significativos. Los recursos ecológicos incluyen la vida silvestre, biomas acuáticos, la vegetación y sus hábitats. En contraste, muchos de los aspectos que se pueden ver afectados en el ambiente corresponden principalmente a la flora y la fauna de donde se desee extraer, dado que en ocasiones la accesibilidad al sistema geotérmico puede generar dificultades a la hora de su

extracción, lo cual hace que se fracturen zonas boscosas para poder llegar a esta, lo cual conlleva a limitar los corredores ecológicos de la fauna que se encuentre presente.

Sin embargo, existen dinamismos estadísticos que permiten determinar y analizar los impactos ecológicos y ambientales que se pueda generar de la misma, uno de ellos es la matriz de Leopold, la cual se encarga de analizar la causa-efecto de cualquier proyecto energético o estructural que se realice en una zona donde la proliferación ambiental sea determinante, según [7] *la utilización de este tipo de matrices se puede acomodar a todo tipo de proyectos*, dando así unos resultados de planificación para cuantificarlos de una manera tal que permita la visualización de estos dentro de cada acción que se de en el proyecto geotérmico, de forma rápida. Esta metodología se puede aplicar a este tipo de proyectos específicos no sólo mejorando sino, también, adecuándose a la región.

2.3 Fase 3

Finalmente, a partir de la obtención de energía calorífica de la tierra se deben de tener en cuenta los parámetros básicos para la captura de dicha energía, en primera instancia, la zona de estudio debe contar con las características geomorfológicas y geológicas para el transporte adecuado del calor, principalmente de zonas que contengan gran cantidad de energía tanto vulcanológica como sísmica, dado que en estas zonas la acumulación de flujo térmico es mayor, siendo así la espacialización del lugar uno de los aspectos más importantes. Por otra parte, se debe de tener en cuenta, como los sistemas geotérmicos interactúan en el terreno, ya que en terrenos volcánicos debido a los diferentes yacimientos que se pueden encontrar y los diferentes tipos de rocas que allí subyacen, puede tener características que faciliten o dificulten la obtención de dicha energía, siendo la permeabilidad y la conductividad térmica de las rocas el factor clave para la identificación de los yacimientos que se encuentren disponibles.

Asimismo, tal como lo enuncia [19] la permeabilidad se define como la facilidad de los fluidos de transitar a través de diferentes tipos de rocas, en muchos casos la fluidez en los sistemas geotérmicos es mínima, sin embargo debido a las fracturas a los diferentes tipos de fallas que se encuentren en el sistema, el fluido puede filtrarse desde las capas internas hasta las capas externas, muchos de estos recursos se pueden encontrar a partir de los hidrotermales, donde este se encarga de transferir el calor interno de la Tierra por medio de la circulación de agua caliente o de vapor, este puede circular por la corteza debido a que en los yacimientos pueden existir fracturas de rocas.

Es importante mencionar, que la manifestación por parte de este fluido se puede relacionar con sistemas geotérmicos ya sean de carácter termal, fumarolas, géiseres, entre otros aspectos, para [19] el tener aspectos o manifestaciones superficiales, permiten tener mayor facilidad de acceso a esta energía, empero, en caso de que no se presenten de forma superficial, los estudios que se deben de realizar van más allá de la especialización de la zona, debido a que se deben de realizar análisis geofísicos, geoquímicos, geológicos e hidrogeología para determinar el tipo de yacimiento que allí se encuentra, sin embargo, al contar con áreas que permitan y tengan diversos sistemas de fracturas en la roca, las cantidades de fluido hidrotermales serán mayores.

Sin embargo, muchos de los afluentes geotérmicos pueden presentar características que a medio o largo plazo pueden perjudicar las infraestructuras o al ambiente, debido a su diversa composición química, generando así corrosión o deterioro en los instrumentos para la obtención de energía o que puedan afectar directamente al ambiente, por ende, se debe de tener en cuenta todos los parámetros químicos y geoquímicos que presenta el suelo junto con su fluido, uno de estas características se basa en el contenido total de sólidos disueltos llamado también tds, donde según [20] se puede relacionar con la sumatoria de todos los compuestos, minerales, metales y sales disueltos en un fluido, a lo cual, para un recurso geotérmico según [19] estos deben de oscilar entre una determinada centena hasta 300.000 mg/l, lo cual hace que a medida que aumenta los miligramos de tds en litros de fluido puede ocasionar mayor turbidez en el recurso, sin embargo, estos valores pueden variar por los diferentes afluentes que se encuentran alrededor del mundo, aunque por otra parte, puede existir una similitud en su pH, dado que estos valores oscilan entre 8,5 a lo cual se refiere que tiene un potencial de hidrógeno moderadamente alcalino y en algunos casos cuentan con valores de 5,5 siendo moderadamente ácido, lo cual indica que, puede contar

con diferentes compuestos químicos que, a largo plazo, pueden generar deterioro y corrosión tanto a nivel ambiental como a nivel de captación de energía.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Fase 1

En el proceso de la identificación de las variables de fuentes hídricas para uso de energía geotérmica se analizaron los tipos de fluidos que se generan, su potencial en la transformación a energía eléctrica o el uso en calefacción y climatización. Con estas características se obtienen las pautas para la interpretación del potencial energético. Teniendo en cuenta que la zona de estudio corresponde al departamento de Caldas, se identifica una región de gran potencial para energía geotérmica, localizado en el Volcán Nevado del Ruiz V.N.R, como se observa en la Figura 4, este permite identificar el tipo de fluido presentado.

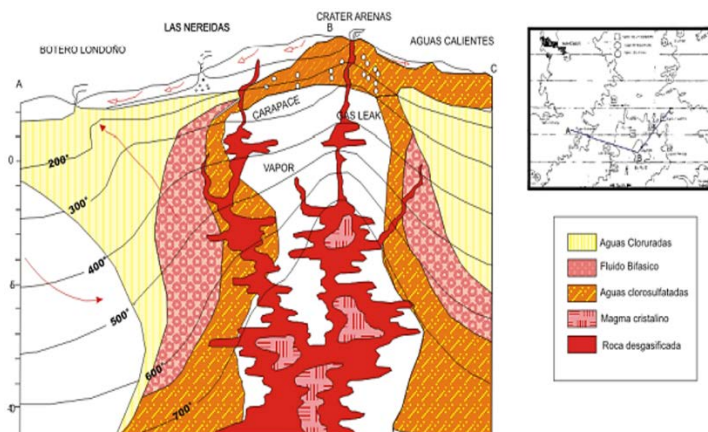


Figura 4. Perfil esquemático del V.N.R mostrando una distribución potencial de los fluidos

Por consiguiente, se observa que según el modelo se tienen fluidos con características de Aguas Cloruradas, en estas se tiene [17] que el contenido de cloruros varía según la cantidad de sales presentes y se relacionan con lixiviadas de las rocas del reservorio, o con las reacciones entre HCl magmático y los minerales formadores de roca. La concentración de la mayor parte de los componentes permite establecer el equilibrio local con minerales secundarios si la temperatura supera los 100 –150 °C. Asimismo, se tienen aguas bifásicas o mezcladas y cloruro-sulfatadas, que permite identificar los usos y aplicaciones, tanto a nivel de producción de energía eléctrica, como para usos de calefacción.

Cabe destacar que, para realizar este tipo de análisis y determinar el potencial energético de la zona de estudio, se debe establecer las zonas de mayor temperatura, dado que con esta información se obtiene la entalpía y por ende el tipo de aplicación que se puede dar. Para obtener la entalpía de la zona de estudio se propone el uso de la ecuación establecida [16], donde se presentan una serie de variables determinantes para la manipulación para este tipo de energía, tal como lo muestra la ecuación (1).

$$H = Ho * Ro \quad (1)$$

Donde:

H= Entalpía (J)

Ho= Entalpía contenida en un reservorio bajo un área (J)

Ro= Factor de extracción de energía

Por medio de la ecuación (1) se tiene en cuenta los factores de gradiente térmico, debido a que esta permite identificar de una forma cuantitativa y específica el tipo de recurso que se encuentra en un área en específico, uno de los factores que se debe de tener en cuenta, es la temperatura, debido a que esta permite identificar en primera instancia el tipo de yacimiento y dependiendo del tipo de yacimiento este se podría clasificar en los diferentes tipos de recursos geotérmicos, a lo cual llevaría a identificar las actividades de su obtención y las actividades energéticas que se puedan suplir dependiendo de la temperatura obtenida.

En consecuencia, se obtiene que de las fuentes establecidas como en la Figura 4, los usos que se pueden dar consisten en la generación de energía eléctrica en las zonas donde la temperatura es superior a los 90°C, además de que se puede emplear en usos industriales [16] como secado de productos, destilación de agua dulce, entre otros.

a lo cual conlleva, que a partir de una temperatura de 90°C, puede establecerse parámetros de producción de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, principalmente de los hidrotermales, ya que temperaturas mínimas a estas, se pueden dar aunque es limitante para la producción mínima de energía eléctrica, sin embargo, podría abastecer zonas aledañas a los recursos geotérmicos, por otra parte al tener un gradiente mayor a 90°C tiene mayor factibilidad en su producción, empero, para determinar todos estos factores de temperatura, es necesario conocer las variables fisicoquímicas que este presenta y como el fundamento de la termodinámica puede dar ímpetu a unos datos tangibles y precisos.

3.2 Fase 2

Como se ha mencionado con anterioridad, la producción de energía geotérmica, así como las demás fuentes, provoca daños en el medio en el que se realiza, los cuales pueden verse reflejados en cada una de las fases que requiere antes de su funcionamiento. Entre ellos, se han encontrado la sismicidad y subsidencia del terreno, evaluadas en rangos muy bajos como para representar un cambio drástico en el ambiente; contaminación tanto de las aguas superficiales y subterráneas, como de la atmósfera; desecho de residuos sólidos; entre otros. Además de los posibles impactos generados a las especies y la población que habitan en la zona.

Referente a su análisis y soluciones, se encontraron metodologías como el Análisis de ciclo de vida, el cual *consiste en obtener todos los impactos ambientales que un producto o servicio genera desde su creación hasta el final de su vida útil* [21] en donde se definen ciertas categorías de impactos a evaluar; así como [7] propone otras alternativas consideradas relevantes para este trabajo como las listas de chequeo, con alcances básicos pero sencillos de aplicar; un método de Conesa simplificado, donde se utilizan rangos para la determinación de las categorías para los impactos; el método de superposiciones de Mc Harg, que permite la superposición de mapas para tener una representación de la zona de estudio, siendo muy útil como herramienta para la evaluación y localización de una fuente hidrotermal por medio de los SIG; y la matriz de Leopold, aportando resultados en formato de una matriz que analiza causa y efecto.

En suma, las categorías tenidas en cuenta, a partir de los métodos para el análisis de impacto ambiental deben ser analizadas junto a los resultados obtenidos, enfocado en la determinación de si los impactos generados son reversibles, el tiempo necesario y los elementos que permitan la recuperación más completa posible del ecosistema transformado; como propósito de dar solución a estos, es relevante tener en cuenta la importancia que posee la interdisciplinariedad aplicada a estos problemas, debido a que así como es importante el conocimiento colectivo para las etapas previas al funcionamiento de una planta de producción geotérmica, para la búsqueda de alternativas para la recuperación de la zona también lo es.

De igual forma, es significativo resaltar ciertos elementos como el evitar la sobreexplotación de los recursos, la supervisión del yacimiento para la producción a largo plazo y el modelado del yacimiento con el objetivo de contar con información al respecto para diferentes fines, como la investigación, la elaboración de otros proyectos similares y la transformación de sí mismo.

3.3 Fase 3

En primera instancia, se encontró que *los tres parámetros básicos de cualquier sistema geotérmico son: una fuente de calor, un mecanismo de transporte de dicho calor (agua), y un sistema permeable para poder transportar dicho calor* [19]; encontrando también que condiciones como el tamaño del pozo permiten la proyección aproximada de la reserva de este y la capacidad de transmisión de energía. Además, [22] afirma que *el tamaño del recurso presente determinará el plan de perforación a ejecutar, a la vez que el diseño de la planta, las tuberías y el sistema de reinyección de agua*, siendo un medio que aporta al proceso de la determinación de la viabilidad de la energía geotérmica en una zona específica.

No obstante, aparte de lo mencionado, como parámetros naturales que requiere el medio para la existencia de un yacimiento es necesaria la presencia de un foco de calor activo, un material permeable por donde el agua tenga una salida con una base impermeable que permita la acumulación del líquido en una zona específica y que evite su escape. Es en este punto donde el tipo de suelo presente juega un papel importante en su extracción y provocará ya sea una facilidad o dificultad en la llegada hasta el recurso.

En el caso de la presencia de sistemas hidrotérmicos, [6] agrupa como condiciones determinantes del tipo de tecnología necesaria para su extracción la entalpía, que permite considerar la cantidad de energía contenida en el yacimiento y su transporte a la superficie; a partir de allí es posible su clasificación según la temperatura presente en un yacimiento de baja, media o alta entalpía ; el estado físico del agua, es decir si se presenta líquida o en forma de vapor; la cantidad de sales disueltas que esta posea y la presión a la que se encuentre; además de un método por medio de la fractura de la roca para la ejecución del sistema respecto al flujo del líquido.

Así mismo, los parámetros fisicoquímicos cumplen un papel esencial en el establecimiento de las condiciones que requiere la producción de energía por geotermia y su constante monitoreo, a fin de conservarse por el mayor tiempo posible. Entre estos parámetros se encuentran principalmente la temperatura, pH, turbidez del líquido y los cloruros.

De acuerdo a los estudios de exploración ejecutados en la zona de Caldas y en los complejos volcánicos presentes en su territorio, ha sido posible la detección de zonas que permitan la producción de esta energía; sin embargo no ha sido formalizado ningún proyecto en el que se llegue a la etapa de producción, por lo cual se hace preciso una mayor investigación del tema y la planeación de su aplicación teniendo en cuenta factores como las posibilidades presentes en el país referida a la actividad geológica que presenta, la cual es también es un buen indicio de la presencia de este recurso para su aprovechamiento.

4. CONCLUSIONES

La energía geotérmica es catalogada como una energía verde debido a los altos parámetros de conservación y de disminución de contaminantes en comparación con las energías fósiles convencionales, además de que la energía geotérmica es catalogada como una energía inagotable, debido a que se adquiere a partir del calor interno de la Tierra, sin embargo, para la extracción y transformación de este tipo de energía es necesario conocer las características, aspectos y otros factores asociados que puede ofrecer, una de ellas son yacimientos que permiten la obtención de esta energía a nivel superficial y se puede representar en diferentes clases, tal como los manantiales, donde estos se caracterizan principalmente por sus afluentes con gran contenido térmico, sin embargo, es importante mencionar que para la producción de esta energía se deben de tener en cuenta los aspectos geológicos de la zona de estudio, además de las variables fisicoquímicas que permiten comprender de mejor forma el proceso que se debe realizar y los mecanismos que se aplican.

En este orden de ideas, a partir de las variables térmicas analizadas, se enfatiza que la producción de esta energía, se basa principalmente en la ley de la entalpía y cómo a partir de estas condiciones térmicas, el uso de esta puede ser suministrado para la generación de energía eléctrica o por lo contrario se puede utilizar en otras labores, además, el uso de variables para determinar la factibilidad térmica permite que los estudios de las zonas tengan gran precisión al momento de realizarlos, esto quiere decir que, con base a estas variables hidrotermales, se pueden especificar el uso de esta energía, debido a que uno de los principales fundamentos para manipular esta energía, es conocer el gradiente térmico que presenta el fluido y además conocer las características de las rocas que allí se encuentran, debido a que la conductividad y las características fisicoquímicas que allí se encuentran puede dificultar o facilitar la extracción de esta energía.

Por otra parte, se tiene el aspecto ambiental, el cual es muy importante para un equilibrio entre energía y ambiente, es indispensable mencionar que el área de estudio se encuentra focalizado en el departamento de Caldas, el cual es uno de los departamentos que cuenta con un gran potencial para esta energía debido a sus complejos volcánicos y sus hidrotermales que subyacen del mismo, aunque, muchas de las zonas

cercanas al volcán se encuentran protegidas, debido a que hace parte del Parque Nacional Natural Los Nevados, se pueden realizar estrategias para que los impactos de esta energía en el ambiente no sean de gran magnitud, por medio de esto, con base a la matriz de Leopold y el uso de la espacialización por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se pueden adaptar nuevas metodologías que permitan la recopilación de datos por medio de estas herramientas y la cuantificación de matrices que permitan medir el impacto ambiental sin causar algún deterioro en el mismo y siguiendo la reglamentación jurídica para la protección de fauna y flora y generar un desarrollo sostenible.

Por otro lado, se observa que el desarrollo de este proyecto va enfocado hacia un vínculo recíproco, sostenible y efectivo entre la universidad y su entorno social y natural, permitirá que la universidad La Gran Colombia Armenia enriquezca sus procesos de generación y transferencia de conocimiento, pero además de que potenciará su papel activo y humano para la protección del territorio y el aprovechamiento de las energías renovables, cumpliendo de esta manera con las premisas de la responsabilidad social universitaria. Adicionalmente se genera una conservación de la dignidad, los derechos, la seguridad y el bienestar de las personas que se encuentran en el proceso de este proyecto; buscando mantener el respeto por el ambiente, los ecosistemas naturales y el entorno general que conlleva la investigación planteada.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de energía de Argentina. Energía geotérmica. Recuperado: http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf
- [2] D. A. Moreno-Rendón, J. López-Sánchez, and D. Blessent, "Geothermal Energy in Colombia as of 2018", *IyU*, vol. 24, Feb. 2020.
- [3] Marzolf, N. Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. 2014, Recuperado: https://www.researchgate.net/profile/Natacha_Marzolf/publication/283328511_Emprendimiento_de_la_Energia_Geotermica_en_Colombia/links/5633d51208aeb786b7013c01/Emprendimiento-de-la-Energia-Geotermica-en-Colombia.pdf
- [4] González, Z. La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales. *Innovación y desarrollo tecnológico. Revista digital*, 9, 137-141. 2007, Recuperado: https://iydt.files.wordpress.com/2018/02/3-1_la-sustentabilidad-de-la-energ%C3%ADa-geot%C3%A9rmica-y-sus-impactos-ambientales.pdf
- [5] Bussotti, F., Cenni, E., Cozzi, A. & Ferretti, M. The impact of geothermal power plants on forest vegetation. A case study at Travale(Tuscany, Centar Italy). *Environ Monit Assess* 45, 1997, 181-194. Recuperado: <https://ugc.elogim.com:2231/10.1023/A:1005790728441>
- [6] Gil, A. La energía geotérmica como fuente alternativa de abastecimiento para la demanda en Colombia. 2019, Recuperado: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/26919/%20%09amgilg.pdf;jsessionid=04F686974BDA16BAAAFB39085767206A.jvm1?sequence=1>
- [7] Mejía, N. Metodología adaptada para valoración del impacto ambiental potencial ocasionado por el aprovechamiento de energía geotérmica sobre el complejo "Parque Natural Nacional de Los Nevados (PNN Los Nevados) y su zona de amortiguación en las áreas de influencia de los departamentos de Caldas y Risaralda". 2013, Recuperado: https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/1316/Mejia_Nari%C3%B1o_Nestor_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- [8] Valenzuela, F. Energía geotérmica y su implementación en Chile. 2011, Recuperado: <https://riat.utralca.cl/index.php/test/article/view/115/70>
- [9] Pantoja, J & Gómez, J. os sistemas hidrotermales y el origen de la vida. 2004, Recuperado: <https://www.revistacienciasunam.com/es/78-revistas/revista-ciencias-75/631-los-sistemas-hidrotermales-y-el-origen-de-la-vida.html>
- [10] Servicio Geológico Colombiano. Geotermia en Colombia. 2019, Recuperado: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>
- [11] Departamento Nacional de Planeación, World Bank Group, Korea Green Growth Partnership, & Enersinc. Energy Supply Situation in Colombia. 2017, Recuperado: <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Supply%20Situation%20vf.pdf>
- [12] Ministerio de Ambiente. Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974. Minambiente. 1974, Recuperado: https://www.minambiente.gov.co/images/gestionintegraldelrecursohidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
- [13] Ley 1715 de 2014. Secretariassenado. 2014, Recuperado: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- [14] Gobierno de Caldas. Geografía de Caldas. 2017, Recuperado: <https://caldas.gov.co/index.php/portfolio-2/informacion-general/geografia-de-caldas>

- [15] Suarez, M. Termodinámica del fluido geotérmico en condiciones supercríticas. 2012, Recuperado: <https://biblat.unam.mx/es/revista/geotermia/articulo/termodinamica-del-fluido-geotermico-en-condiciones-supercriticas>
- [16] Abril, M. Estudio sobre la generación de energía geotérmica para su aprovechamiento en el sector de la construcción y las cimentaciones. 2017, Recuperado: <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4472/Abrilmiguel2017.pdf?se>
- [17] Cerpa, A. Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el Volcán Cerro Machín, Colombia. 2014, Recuperado: https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2250/CerpaAngie_2018_CaracterizacionPotencialGeotermico.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [18] M. Soltani *et al.*, "*Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews*", vol. 140. Elsevier Ltd, p. 110750, Apr. 01, 2021.
- [19] Instituto Geológico y Minero de España. Análisis metodológico de las técnicas bioquímicas empleadas en prospección geotérmica. 1985, Recuperado: http://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001_0001.pdf
- [20] Sigler, A & Bauder, J. Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales. Recuperado: http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-15-SP.pdf
- [21] Lorente, C. (2021). Impacto ambiental de la energía geotérmica en aplicaciones residenciales mediante análisis de ciclo de vida. Recuperado: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=286856>
- [22] Arias, G y Acevedo, A. (2017). Estado actual de la producción de energía geotérmica en Colombia. Recuperado: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13221/1087995573.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Análisis de variables físicas relacionadas con taludes de tierra

Tatiana Pérez Gosteva¹
Mayra Alejandra Gómez Moreno²
Universidad La Gran Colombia
Colombia

Los deslizamientos de tierra son movimientos en los que una masa de suelo o roca se desplaza sobre una superficie al superar su grado de resistencia. La masa se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido. Actualmente, algunos municipios colombianos se ven afectados por estos eventos de deslizamientos, entre los que se encuentra el municipio de Pijao, Quindío. Por esta razón se evidencia la importancia de realizar estudios dentro de esta temática con el objetivo de ayudar a mitigar las afectaciones, los elementos expuestos, la vulnerabilidad y el grado de amenaza. Por consiguiente, se observa una serie de métodos, pasos y procesamientos que permiten identificar cosas relevantes, tales como los factores desencadenantes o el factor de seguridad, además de que dentro de la planeación territorial se realizan una serie de procesos que permiten llevar a cabo una toma de decisiones y una serie de procesos acertados y efectivos, donde se reducen los factores de riesgo en conjunto con la gestión del riesgo de desastres que constantemente evolucionan, para mejorar la calidad de vida de las personas. Finalmente, se observa la necesidad de continuar estudiando estas temáticas para brindar soluciones y alternativas a las problemáticas que generan los deslizamientos de tierra o taludes.

¹ Ingeniera electrónica, Magíster en Gestión de la prevención de riesgos laborales, la excelencia, el medio ambiente y la responsabilidad corporativa.

Contacto: perezgostatiana@miugca.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Geográfica y Ambiental.

Contacto: gomezmormayra@miugca.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra son movimientos relativos de masa de suelo o roca respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura, al superarse la resistencia de corte de estas superficies. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido [1]. Por otro lado, este fenómeno puede producirse de distintas maneras, es decir, en forma lenta o rápida, con o sin provocación aparente. Generalmente, se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones en el pie del talud. Sin embargo, existen otros casos donde la falla se produce por desintegración gradual de la estructura del suelo [2].

Cabe mencionar que los tipos de fallas más comunes en taludes son: Deslizamientos superficiales, movimiento del cuerpo de talud y flujos. Los primeros, están sujetos a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones de suelos próximas a su frontera deslicen hacia abajo. Por lo tanto, el proceso es más o menos continuo y por lo general lento, del deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas [2]. Los segundos, ocurren en movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo.

Esta se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan esfuerzos cortantes que sobrepasan la resistencia al corte de material [2], se debe añadir que, esta falla se subdivide en: falla rotacional y falla traslacional. Por último, se tiene los flujos que son movimientos más o menos rápidos de una parte de la ladera natural, de tal manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de velocidades y desplazamiento se asemeja al comportamiento de un líquido viscoso [2].

Por otro lado, las principales partes de un deslizamiento son: Corona, escalón, cabeza, grietas longitudinales, grietas transversales, grietas radiales y pie, como se observa en la Figura 1.

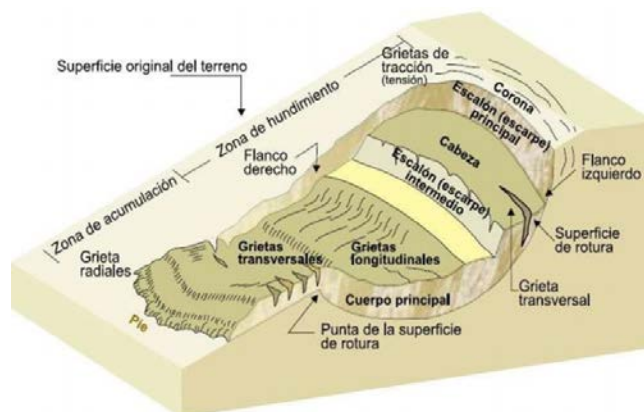


Figura 1. Zonificación de la degradación de suelos por erosión en Colombia

A su vez, la clasificación de los movimientos en masa tiene en cuenta el sistema: Caído, inclinación o volteo, reptación, deslizamiento, esparcimiento lateral, flujo, avalancha y movimientos complejos.

Ahora bien, los deslizamientos pueden ser ocasionados por la erosión, la cual está asociada a la pérdida de estabilidad de taludes y derrumbes, con grave riesgo para habitantes localizados en zonas cercanas. Asimismo, los sedimentos pueden transportar algunos contaminantes derivados de los agroquímicos aplicados al suelo, como fósforo, nitrógeno y residuos de plaguicidas [3]. Con respecto a Colombia, el 40% del territorio presenta algún grado de erosión (Figura 2), el cual se define como la pérdida o destrucción de las capas del suelo por la acción única o combinada del agua, viento o por la acción del humano. Es necesario mencionar que, la erosión que predomina en el país es la erosión laminar con un 19,33 %, esta se presenta por el exceso de lluvias que provoca la pérdida de partículas y elementos nutritivos del suelo. A su vez, en el país se presentan otros tipos de erosión en el territorio tales como terrazas, surcos, cárcavas, entre otros.

Dado lo anterior, para el contexto del departamento del Quindío, se tiene que debido a su posición geográfica sufre de este fenómeno constantemente, afectando las actividades diarias de los habitantes.

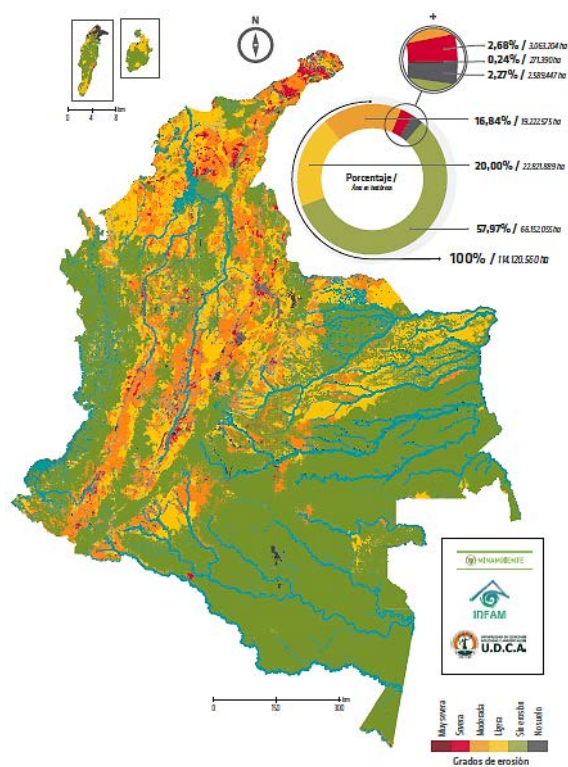


Figura 2. Zonificación de la degradación de suelos por erosión en Colombia

Asimismo, el departamento presenta otros factores de riesgo tales como: inundaciones, sismicidad, entre otros que amenazan la tranquilidad y seguridad de la población quindiana. Uno de los municipios que posee todos estos factores de riesgo corresponde a Pijao, Quindío (Figura 3), este municipio posee una superficie total de 243,12 km² y está conformado por tres tipos de relieve; montaña, piedemonte y valle, donde el paisaje de montaña se encuentra ubicado sobre rocas metamórficas, también se observa el accidente geográfico de la falla de san Jerónimo que se caracteriza por la formación de grandes pendientes.

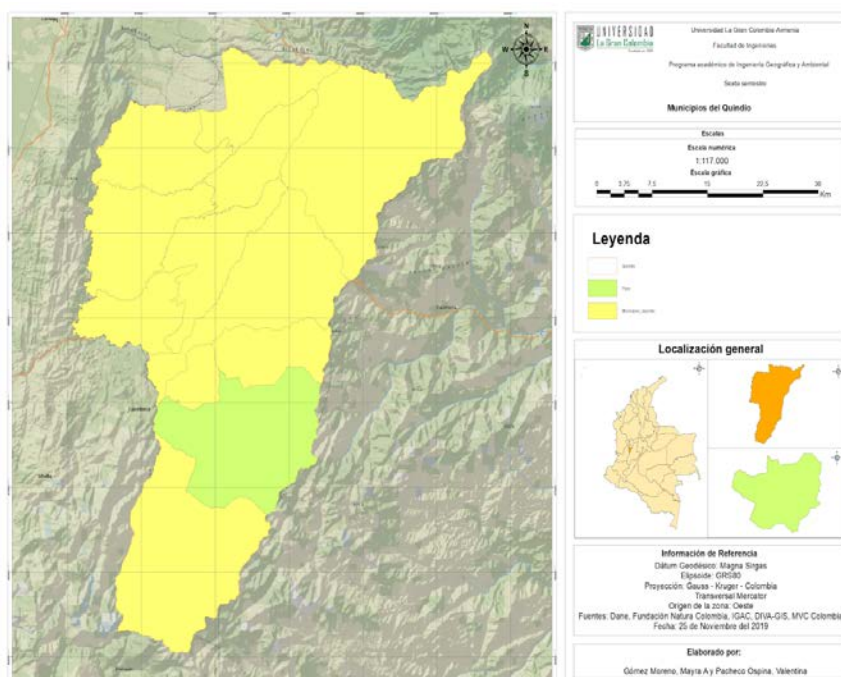


Figura 3. Ubicación del municipio de Pijao en el departamento del Quindío

Considerando que, el municipio de Pijao posee factores de riesgo que amenazan con la seguridad de la población se hace necesario estudiar este fenómeno debido a que, los movimientos gravitacionales obstaculizan constantemente las principales vías del municipio, tal y como sucedió con el sismo de gran

magnitud del año 1999 que produjo un gran número de deslizamientos, donde la mayoría fueron de poco volumen pero que alcanzaron a interrumpir varios sectores de las vías. Por esta razón se plantea como objetivo de esta investigación, analizar las variables físicas generales que se relacionan con taludes de tierra, así como, los factores condicionantes y desencadenantes que afectan la estabilidad de estos. Igualmente, estos estudios hacen parte de los planes de gestión de riesgo involucrados en los planes de ordenamiento territorial.

Por otro lado, desde un componente de carácter legal se observa que para realizar los planes de gestión de riesgo en el país, se cuenta con la ley 1523 de 2012, la cual declara que la gestión del riesgo de desastres, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones para el conocimiento, la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible [4].

Esta ley es de suma importancia a la hora de generar los planes que permitan mitigar el riesgo de la población ante algún movimiento telúrico de gran magnitud. Sin embargo, para poder generar dichos planes es necesario realizar estudios sobre estos. En Colombia, la institución encargada de desarrollar estas investigaciones es el servicio geológico colombiano [5].

Adicionalmente, se tiene la ley 46 de 1988 en la que se crea y organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de desastres, la cual tiene tres objetivos:

1. Definir las responsabilidades y funciones de todos los organismos y entidades públicas, privadas y comunitarias, en las fases de prevención, manejo, rehabilitación, reconstrucción y desarrollo a que dan lugar las situaciones de desastre;
2. Integrar los esfuerzos públicos y privados para la adecuada prevención y atención de las situaciones de desastre;
3. Garantizar un manejo oportuno y eficiente de todos los recursos humanos, técnicos, administrativos, económicos que sean indispensables para la prevención y atención de las situaciones de desastre

Entrando en materia, para el caso de las ciudades se tiene la ley 09 de 1989 que establece que con el objetivo de lograr condiciones óptimas para el desarrollo de las ciudades y de sus áreas de influencia en los aspectos físico, económico, social y administrativo, los municipios con una población mayor de cien mil habitantes, deberán formular su respectivo plan de desarrollo de conformidad con la política nacional y departamental, las técnicas modernas de planeación urbana y con base en la coordinación del desarrollo urbano-regional [6]. Estos planes de desarrollo son importantes a causa de que permiten saber dónde se encuentran las zonas de más riesgos sísmicos y hacia dónde se deben expandir los municipios del departamento.

2. MÉTODO

El método de investigación que se formula en este proyecto es empírico- analítico puesto que, permite establecer el comportamiento de los movimientos gravitacionales en la zona de estudio. El enfoque es mixto debido a que se usará variables cualitativas que describirán las características de los deslizamientos de tierra e igualmente se usará variables cuantitativas, con las que se establecerá el factor de seguridad de los taludes. Por consiguiente, el tipo de investigación es exploratoria - evaluativa debido a que permite identificar las variables y dinámicas presentes en la relación de los taludes y las variables físicas que se analizan, en el sector La Ofelia en el municipio de Pijao, Quindío.

2.1 Fase 1: Identificar los factores condicionantes

En esta primera fase se determinan factores que influyen en la estabilidad de los taludes y que dependen de la naturaleza propia de los suelos y rocas como: geología, uso de suelo y vegetación, forma del terreno (pendiente), entre otros [7]. A su vez, se deben proporcionar representaciones cartográficas de estos factores que permiten establecer la susceptibilidad de la zona, la cual es una propiedad del terreno que

indica que tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que pueda ocurrir inestabilidad, y se refiere solamente a factores intrínsecos a los materiales naturales de la ladera, sin considerar factores desencadenantes [7].

Por consiguiente, con el software ArcGIS se procesan una serie de capas que permiten obtener los factores condicionantes. Como primer proceso, se extrae de la capa de fallas geológicas, las fallas presentes en el municipio de Pijao, utilizando el geoprocetamiento clip de ArcMap. Este procedimiento se repite con la capa de clase de suelo y tipo de paisaje. Se debe agregar que, se obtuvo la capa de construcciones urbanas y rurales con el fin de saber cuál es el impacto de estos factores sobre la población. Por otro lado, a partir de un DEM se obtienen las pendientes en porcentaje con la herramienta slope. Una vez se tiene esta capa de pendientes se procede a reclasificar con los valores: 1 para pendientes bajas, 2 para pendientes medias y 3 para pendientes altas.

2.2 Fase 2: Determinar los factores desencadenantes

En esta fase se determinan los factores desencadenantes como: precipitaciones, actividad volcánica y sísmica presente, los cuales son considerados factores externos que afectan a la estabilidad de los movimientos gravitacionales, dichos factores ocasionan un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento [8]. Considerando que, las lluvias producen modificaciones en la humedad y presión de poros afectando la resistencia del suelo. Por otro lado, los sismos producen fracturación, remodelo y aumento en la presión de poro, mientras que las erupciones volcánicas generan vibraciones, cambios en la temperatura y disposición de materiales sobre el talud.

En este caso, se obtuvo información geográfica del Servicio Geológico Colombiano SGC, la cual es procesada con el software ArcGIS. Las capas que se obtienen del SGC son las fallas geológicas y la amenaza volcánica, de dichas capas se extrae la información del municipio de Pijao a través de la herramienta clip del ArcMap. Este mismo proceso se debe repetir con la capa de promedio multianual de precipitaciones que está presente en los datos abiertos del IDEAM.

2.3 Fase 3: Establecer factor de seguridad

El factor de seguridad se establece a través de un modelo, el cual debe tener en cuenta la mayoría de factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, etc. [8], es por esto que en esta fase se identifica variables como: ángulo, cohesión, presión en poros, base y altura de cada dovela del talud presente en la ladera del sector La Ofelia. Dichas variables permiten obtener el factor de seguridad (FS) a través del método de Fellenius (Figura 3), dicho método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad [9]. A su vez, es una relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla [8]. A continuación, se muestra la ecuación (1) correspondiente a la ecuación de Fellenius.

$$F. S = \frac{\sum[(C' + W \cdot \cos \alpha - u + L) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

Donde:

α : ángulo (°)

C: cohesión (Tn/m²)

Sena: seno del ángulo de la dovela (°)

Cosa: coseno del ángulo de la dovela

b: base (m)

h: Altura (m)

L=b/cosa: longitud de cada dovela (m)

A=b*h: Área de cada dovela (m²)

$w = \gamma \cdot A \cdot (1)$: peso de cada dovela (kg/m²)
 hw : altura del agua fuera del talud (m)
 $u = \gamma_w \cdot hw$: presión de poros (Kg/m²)

Se debe agregar que, el sistema de equilibrio límite de este método *supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie* [8]. Por otro lado, se establece el factor de seguridad a través de método de tablas, las *cuales tiene en cuenta diferentes condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud, incluye sugerencia y grietas de tensión* [8]. Estas tablas son utilizadas para el análisis de estabilidad de taludes de suelos arcillosos sin fricción, en este caso el FS se obtiene por la ecuación (2).

$$F.S = N_o \frac{C}{\gamma H} \quad (2)$$

Donde:

N_o = Número de estabilidad que se obtiene de la tabla

C = Cohesión

γ = Peso Unitario del Suelo

H = Altura del Talud

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Fase 1

En esta primera fase se obtuvo que la clase del suelo presente en el municipio es de clase VI, VII y VIII (Figura 4), estos son suelos con baja fertilidad y deben estar orientados a la conservación de estos, es decir, que deben tener limitadas actividades agrícolas. La clase VI posee problemas o deficiencias más importantes que presentan están vinculados estrechamente a condiciones edáficas como profundidad efectiva limitada, presencia de grava, fertilidad natural generalmente baja, a características topográficas desfavorables y por consiguiente a susceptibilidad a la erosión [10]. Por otro lado, la clase VII son inapropiadas para la agricultura, pero pueden ser usadas con propósitos de explotación de recursos forestales, esta clase posee condiciones físicas que son deficientes debido a que reúnen una mezcla de suelos superficiales a moderadamente profundos. Dichos suelos están afectados por pendientes muy pronunciadas, fertilidad natural baja, presencia de grava y muchas veces rocosidad superficial. Además, tienen problemas de erosión hídrica potencial, pues el régimen pluvial es acentuado y el drenaje muy defectuoso [10].

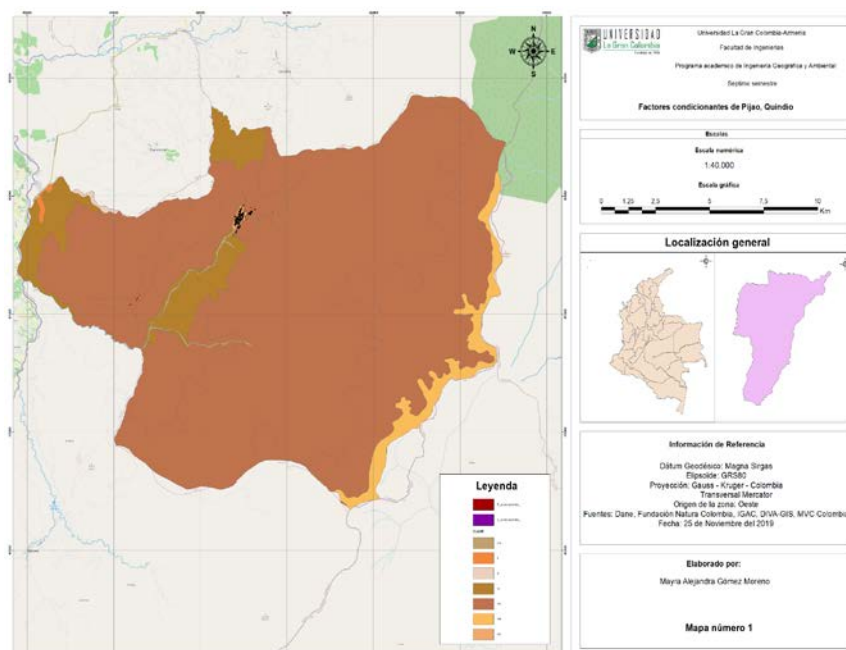


Figura 4. Clase de suelo presente en la zona

Por último, el suelo clase VIII no es apto para actividades agrícolas ni de explotación debido a se caracterizan por sus limitaciones muy severas o extremas, lo que las hacen inapropiadas para fines agropecuarios y aun para propósitos de explotación racional del recurso maderero [10].

A partir de lo anterior, se tiene que el municipio de Pijao se caracteriza por sus paisajes de montaña (Figura 5), el cual está presente en más de un 90 % en la zona e igualmente, al oeste del municipio están presentes los paisajes de valle y piedemonte. A su vez, se observa un cuerpo de agua que atraviesa toda la zona urbana y es por esto que la población se encuentra expuesta al riesgo de inundación, el cual aumenta más su riesgo en las temporadas de lluvias por lo que la Unidad de Gestión del Riesgo de Desastre debe monitorear constantemente esta zona.

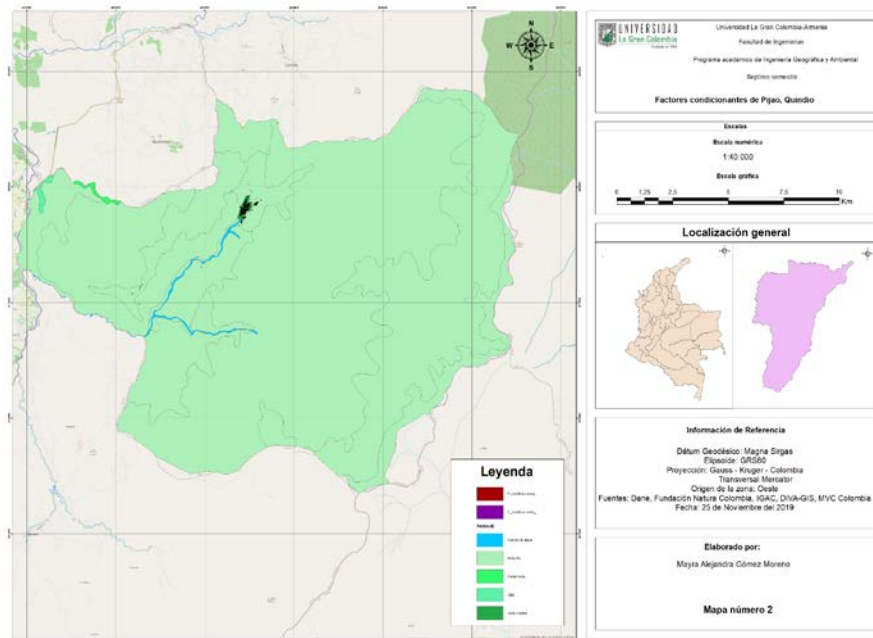


Figura 5. Paisaje presente en la zona

Como se dijo anteriormente, el municipio se caracteriza por sus paisajes de montaña los cuales proporciona una forma del terreno (pendiente) muy particular como se muestra en la Figura 6, donde se evidencia la presencia de pendientes medias y altas en gran parte de la zona. Este factor junto con los otros 2 deja establecer que la susceptibilidad de Pijao a los movimientos en masa es bastante alta, además, la zona urbana se encuentra ubicada en un lugar que sería afectado en gran medida por este fenómeno.

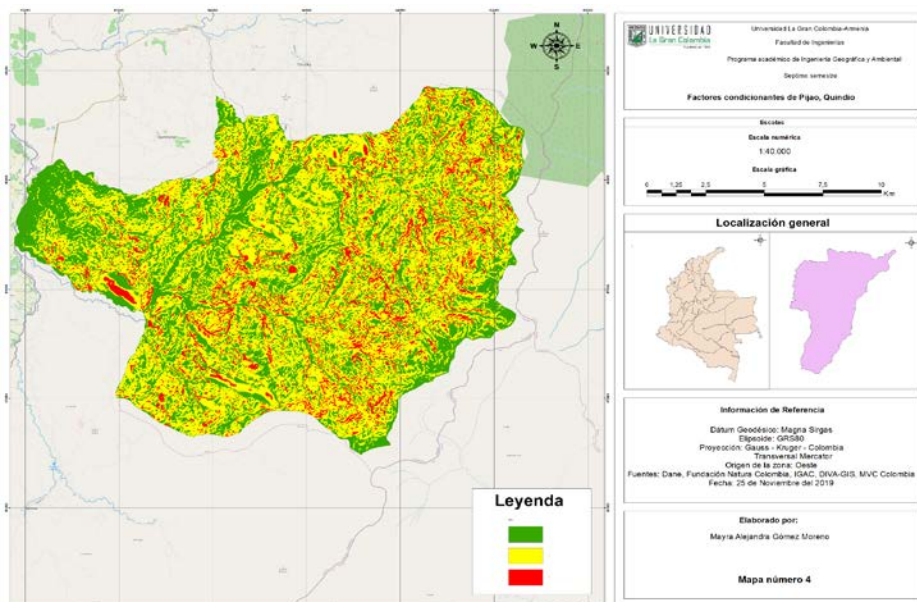


Figura 6. Forma del terreno del municipio Pijao

3.2 Fase 2

Se evidencia que en el municipio de Pijao está presente el sistema de fallas Romeral en sentido Norte-Sur, donde las fallas más importantes y que están ubicadas en el municipio son la falla Silvia-Pijao (causante del terremoto de 1999), San Jerónimo y Córdoba, se debe destacar que la primera falla pasa cerca de la zona urbana en un sector occidental (Figura 7). Estas fallas representan una fuente sísmica bastante importante para la zona puesto que, si una de las fallas se activa y genera un movimiento telúrico, este puede inducir los movimientos gravitacionales.

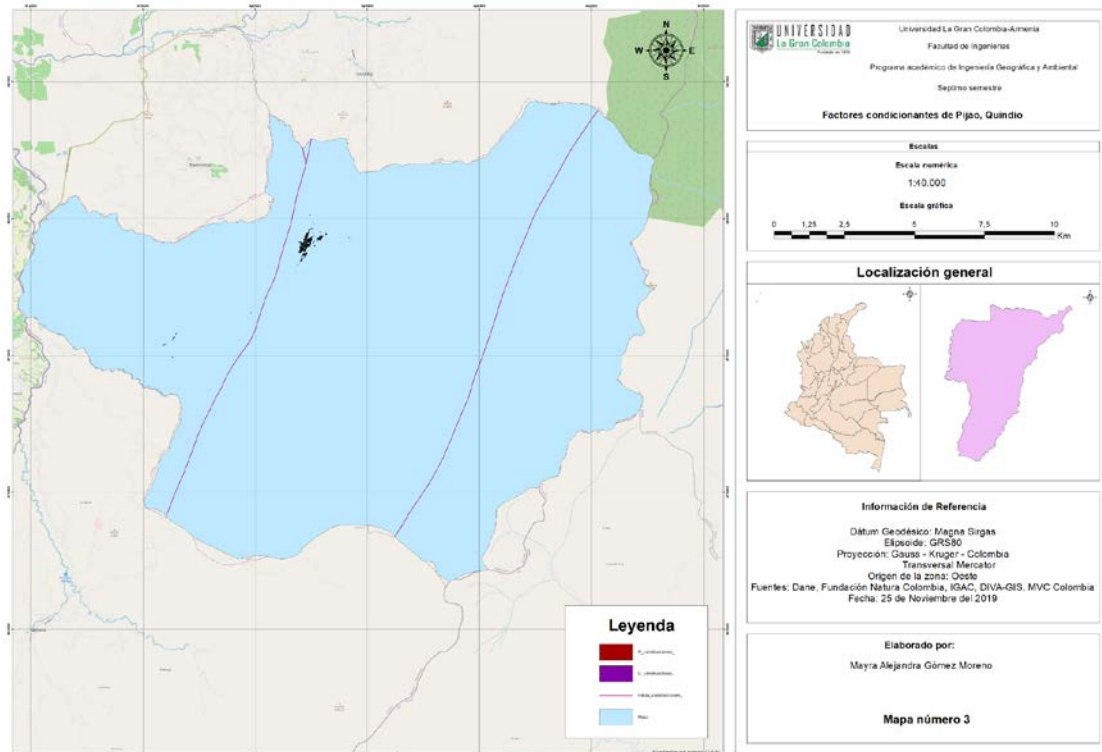


Figura 7. Fallas geológicas de Pijao

Por otro lado, el municipio de Pijao puede ser afectado por el volcán Cerro Machín (Figura 8) en caso de que se active, sin embargo, su principal amenaza es por caída de piroclastos por transporte eólico. Dicha amenaza afecta a toda la parte norte del municipio de Pijao, es decir, que la zona urbana es la más afectada por los piroclastos.

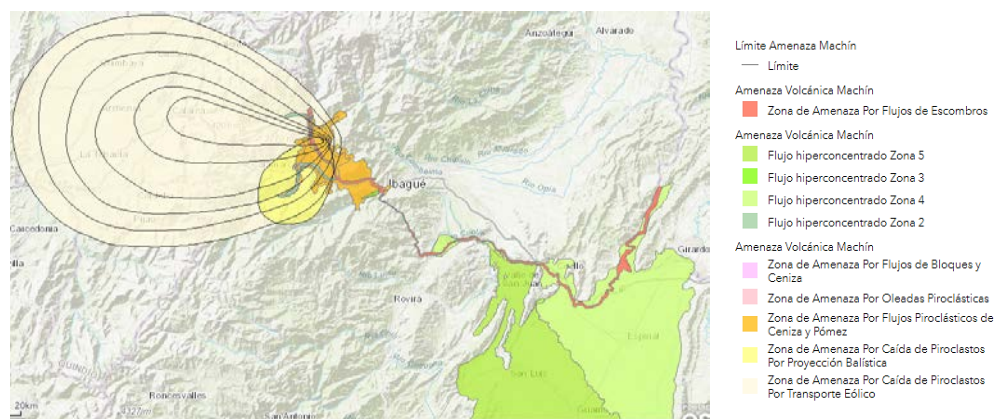


Figura 8. Zonas de amenazas del Volcán Cerro Machín

Otro factor condicionante que afecta la estabilidad de los taludes y que se presenta a lo largo del territorio quindiano son las precipitaciones, las cuales corresponden a la cuenca alta de los ríos Magdalena y Cauca. Es de tipo bimodal con dos temporadas secas, la primera, muy marcada, en los meses de junio, julio y agosto y la segunda, menos notoria, en enero y febrero. Los meses de mayores lluvias son abril y mayo en el primer

semestre y octubre y noviembre, en el segundo [11]. A su vez, la temporada de lluvias provocó que para 2019 en el municipio de Pijao se presentarán diversos movimientos en masa que afectaron la vía de acceso al municipio, además, La vía perdió gran parte de la banca por cuenta de los deslizamientos [12]. Asimismo, las precipitaciones, en el caso de Pijao, se presentan en un rango de 1000 a 2000 mm, como se muestra en la Figura 9, en la que se observa que las precipitaciones son una significativa influencia en la estabilidad de los taludes para la zona de estudio.

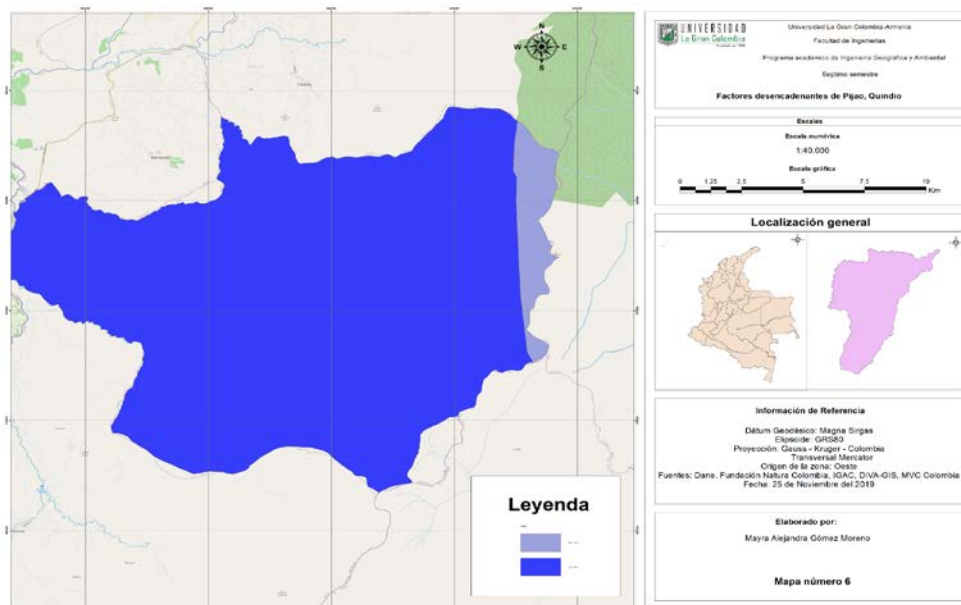


Figura 9. Precipitaciones en Pijao

3.3 Fase 3

La zona de estudio es el sector de La Ofelia (Figura 10) donde la inestabilidad de la ladera es muy evidente, es por esto que se calculó el factor de seguridad de esta. Se observa la zona de estudio en las Figuras 11 y 12. En [13], se analiza la efectividad de las condiciones de diseño y estabilización de taludes.



Figura 10. Ladera Sector la Ofelia Vía Rio Verde-Pijao



Figura 11. Ladera Sector la Ofelia. Zona de estudio



Figura 12. Zona de estudio y muro de contención

4. CONCLUSIONES

Para concluir, el municipio de Pijao posee un alto grado de susceptibilidad a los movimientos gravitacionales, además, posee factores desencadenantes que favorecen la ocurrencia de estos, lo cual provoca angustia e inseguridad en la población.

Es por esto que se hace necesario que se realicen obras de bioingeniería que ayuden a disminuir el impacto de estos sobre los habitantes, este mecanismo de estabilización comprende parámetros ambientales muy importantes.

Asimismo, disminuir las actividades agrícolas presentes en la zona de mayor susceptibilidad puesto que, los suelos en su gran mayoría no son aptos para estas actividades.

5. Referencias bibliográficas

- [1] A. Sepulveda. "Comportamiento Sísmico de Taludes de Roca". M.S Tesis, Universidad Politécnica de Madrid. 2011.
- [2] A. De Matteis. "Estabilidad de Taludes". Geología y Geotecnia. Facultad de Ciencias exactas, ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional del Rosario. 2003. Recuperado: <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
- [3] IDEAM, Ministerio Ambiental y UDCA. "Estudio nacional de la Degradación de Suelos por Erosión en Colombia". 2015. Recuperado: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023646/Sintesis.pdf>
- [4] C. Márquez. "Normatividad del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres". 2012 Recuperado: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20035/Normatividad_del_Sistema_Nacional_de_Gesti%C3%B3n_del_Riesgo_de_Desastres-.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] Servicio Geológico Colombiano. ¿Quiénes somos? (s.f) Recuperado: <https://www2.sgc.gov.co/Nosotros/AcercaDelSgc/Paginas/Quienes-Somos.aspx>
- [6] Alcaldía mayor de Bogotá. Ley 9 de 1989 Nivel Nacional. Régimen Legal de Bogotá D.C. Secretaria Jurídica Distrital. (s.f) Recuperado: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1175>
- [7] Coordinación Nacional de Protección Civil. "Causas que propician Deslizamientos y Medidas de Prevención". Gobernación de México. 2016. Recuperado: <http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/IdentiDeslizamientos.pdf>
- [8] J. Suarez D. "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales". Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. 1998. Bucaramanga. Colombia.
- [9] M. Ardila, S. Cielo y N. Londoño. "Comportamiento de Parámetros Geomecánicas en Taludes Compuestos por Suelos Expansivos". Proyecto de grado. Universidad la Gran Colombia. Bogotá. Colombia. 2015.

- [10] Gobierno de la República de Panamá. "Estudio realizado por la Unidad Técnica del Proyecto Panamá - Darién". Programa de Desarrollo Regional. Panamá. 2000.
- [11] IDEAM. "Quindío". Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Colombia. Recuperado: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/quindio_texto.pdf
- [12] Edición Web. "Emergencia en el sur cordillerano del Quindío por lluvias". El Quindiano. 2019.
- [13] E. Castro S. "Análisis de las condiciones de diseño y estabilización de taludes en el tramo 5 y 6, proyecto vial ruta del sol, sector 2 Puerto Salgar-San Roque" Facultad de postgrados. Universidad de Santander. Bucaramanga. Colombia. 2014.

Evaluación ambiental de medidas y tecnologías para la disminución del consumo de energía eléctrica

Johanna Andrea Celis Campos¹

Universidad Santo Tomás
Colombia

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible en 2012 planteó 17 Objetivos, orientados a disminuir la pobreza y mitigar las problemáticas económicas y políticas ocasionadas por las amenazas al medio ambiente y su impacto al cambio climático. Actualmente, Colombia tiene un consumo energético proveniente en un 68,34% de fuentes hidroeléctricas y 30,29% de fuentes térmicas a partir de combustibles fósiles, actividades que generan emisiones asociadas a Gases de Efecto Invernadero GEI a la atmosfera. Por lo tanto, el presente proyecto propone evaluar ambientalmente medidas y tecnologías para la disminución del consumo de energía eléctrica en una institución educativa de la ciudad de Bucaramanga, promoviendo el uso racional y eficiente de la energía eléctrica URE, a partir de actividades pedagógicas transversales con el proyecto ambiental escolar y la evaluación del perfil de consumo, con el fin de reemplazar las luminarias y equipos por unos más eficientes como alternativa que permita reducir las emisiones GEI corporativa asociadas al perfil de consumo de energía eléctrica.

¹ Contacto: johacelcampos@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra ha estado presentando alteraciones abruptas de temperatura en la atmósfera terrestre, ocasionadas en gran medida por el aumento desproporcionado de gases de invernadero producidos por la acción del hombre (Dióxido de carbono CO₂, Metano CH₄, Óxido nitroso N₂O, Gases fluorados HFC, PFC, SF₆, Gases a base de azufre, entre otros) [1], aspectos que afectan los elementos componentes del clima (temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica, viento, nubosidad y radiación solar) [2]; por ejemplo, la temperatura global aumentó en 0,24°C desde el año 2014 hasta el 2016 debido a la retención de calor en la superficie [3].

Las Naciones Unidas consideran que el cambio climático es un fenómeno que amenaza el desarrollo económico y biológico de diversas comunidades del planeta, problemática que provocará efectos devastadores e irreversibles en la biota terrestre, la salud y el bienestar humano, para lo cual proponen el compromiso de todos los países miembros a cumplir los acuerdos establecidos con el fin de reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [4].

De acuerdo a estos precedentes, el hombre busca satisfacer necesidades en pro de mejorar su calidad de vida, de este modo recurre al uso de diferentes electrodomésticos que le permitan cumplir su objetivo; actualmente se presenta un incremento en el consumo de energía eléctrica debido al uso de aires acondicionados y/o equipos de ventilación, cuya finalidad es mitigar el impacto calórico de su entorno generando espacios ambientales con temperaturas de 17°C en promedio, sin embargo, el uso de estos equipos influye considerablemente en el aumento de gases de invernadero debido a la emisión de hidrofluorocarbonos HFC como refrigerantes [5], así como también necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento, lo cual genera un mayor requerimiento en el mundo.

Teniendo en cuenta que la energía eléctrica considera en su proceso de generación como materia prima la incineración de combustibles fósiles y biomasa, esto da lugar a emisiones GEI de gran impacto al medio ambiente [6]. En el país la capacidad efectiva neta del SIN en función del tipo de generación de energía eléctrica utilizando recursos renovables y no renovables se presenta en la Tabla 1, donde se aprecia que el 30,29% es generado a partir de combustibles fósiles (gas natural, carbón, combustibles líquidos, entre otros) infieren directamente en las emisiones GEI.

Tabla 1. Capacidad efectiva neta del SIN por tipo de fuente de energía en Colombia a mayo 2021 [7]

Fuente de energía	MW	Participación (%)
Eólica	18.42	0.11%
Solar	80.46	0.50%
Cogenerador	149	0.85%
Térmica	5294	30.29%
Hidráulicos	11945	68.34%

Por lo tanto, el hecho de que el porcentaje de participación de las termoeléctricas es alto, contradice el alcance del Objetivo No. 7 de Desarrollo Sostenible planteados por las Naciones Unidas (Energía Asequible y No Contaminante). Sin embargo a partir del objetivo No. 13 (Acción por el clima), se plantean políticas económicas y ambientales orientadas a reducir las amenazas latentes al medio ambiente y su impacto al cambio climático [8].

Por ejemplo, el uso eficiente de la energía es una política que surge debido al incremento desmesurado del consumo y costo de la misma, así como también los factores que afectan el medio ambiente debido a emisiones de gases de efecto invernadero GEI [9].

Además de lo anterior, otro aspecto que permite cuantificar la relación entre la cantidad de emisiones GEI asociada con la actividad económica que se realiza, es el Factor de Emisión FE. Este valor depende del proyecto tecnológico desarrollado: los relacionados con Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL es 0.367 ton CO₂/MWh; los relacionados con inventarios de emisiones de Gases Efecto Invernadero GEI, huella de carbono o Factor de Emisión de la Generación Eléctrica FEG es 0.210 ton CO₂/MWh [10].

La evaluación de los impactos ambientales a partir de los impactos ambientales asociados a las emisiones GEI permiten la toma de decisiones y/o planteamiento de estrategias, originando así políticas ambientales individuales, corporativas y globales con el propósito de mantener la temperatura promedio del planeta por debajo de los 2°C [11, 12].

Por otra parte, la institución educativa realiza el análisis detallado del consumo de energía eléctrica, dado que los costos generados por este consumo en la institución durante el año 2018 se han incrementado considerablemente a pesar de los esfuerzos hechos por el cuerpo administrativo y docente en el proceso de enseñanza teniendo en cuenta los lineamientos del proyecto ambiental escolar PRAE. Por lo anterior, el presente estudio evalúa el impacto ambiental Global asociado al consumo de energía eléctrica a partir del perfil de consumo preliminar, así como también; establecer las estrategias y cambios de tecnologías necesarias a fin de reducir el consumo y sus impactos ambientales asociados a las emisiones GEI.

2. MÉTODO

Las actividades contempladas en este proyecto tendrán como finalidad evaluar estrategias para disminuir el consumo de energía eléctrica en la institución educativa a partir de la ejecución de actividades pedagógicas asociadas al PRAE, así como también; el cambio de luminarias por una tecnología más eficiente, y el mantenimiento preventivo y correctivo de aires acondicionados y equipos de impresión de material pedagógico.

El proyecto será del tipo descriptivo y correlacionar, dado que se desea analizar el aprendizaje de la educación ambiental aplicadas a la preservación de los recursos naturales del entorno escolar a fin de mitigar el uso desmedido de la energía eléctrica. Así como también, proponer alternativas para actualizar los equipos eléctricos con el fin de optimizar la eficiencia energética de los mismos. Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, el proyecto se ejecuta durante las cuatro fases, las cuales se representan en la Figura 1.



Figura 1. Etapas de ejecución del proyecto. Elaboración propia

2.1 Etapa 1: Caracterización del perfil de consumo eléctrico y emisiones GEI en 2018

Se realiza inspección ocular de la infraestructura y equipos eléctricos que se emplean durante la prestación del servicio educativo a fin de establecer el tiempo promedio de uso mensual con el objetivo de evaluar el requerimiento de energía eléctrica y el impacto ambiental potencial asociado a emisiones GEI del inventario de los equipos. Esta caracterización se desarrolla durante el año 2018 dado que será el punto de partida para establecer en la siguiente etapa estrategias para disminuir el consumo eléctrico preliminar. Durante el desarrollo de esta etapa de investigación se realizar las actividades que se describen en la Figura 2.



Figura 2. Actividades de la Etapa 1

2.2 Etapa 2: Planteamiento de estrategias pedagógicas y caracterización del perfil de consumo eléctrico y emisiones GEI en A-2019

Teniendo en cuenta los lineamientos del Ministerio de Educación Nacional asociados al proyecto ambiental escolar PRAE se elabora un plan de actividades pedagógicas enfocadas al uso racional y eficiente de la

energía eléctrica y dirigida a la comunidad educativa que participa activamente durante la prestación del servicio. Lo anterior se realiza durante los meses de marzo, abril y mayo de 2019, tiempo que se denomina A-2019. Las actividades propuestas se detallan en la Figura 3.



Figura 3. Actividades de la Etapa 2

2.3 Etapa 3: Evaluación e implementación de cambios de equipos por unos más eficientes, caracterización del perfil de consumo y emisiones GEI en el período B-2019

A partir de los resultados de la segunda etapa de estudio, se implementa un plan de acción que cumpla con el procedimiento de mantenimiento preventivo y correctivo de luminarias, aire acondicionado y equipos de impresión con el fin de proponer cambios de estos equipos por otros más eficientes. Lo anterior se realiza durante el mes de junio y se evalúan los impactos ambientales durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre del año 2019, tiempo que se denomina B-2019. Las actividades propuestas se describen en la Figura 4.

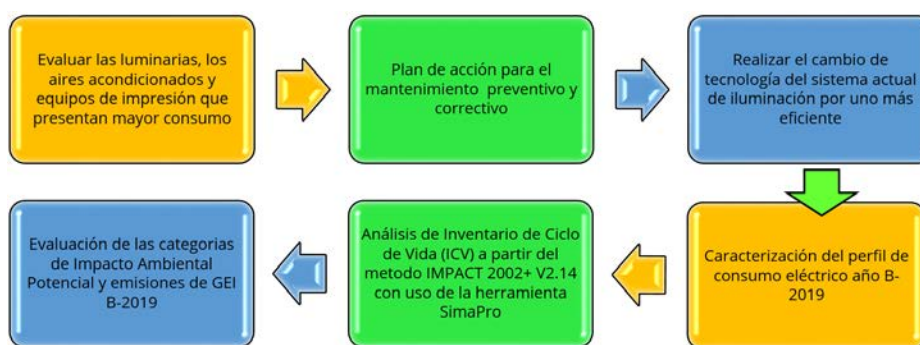


Figura 4. Actividades de la Etapa 3

2.4 Etapa 4: Evaluación ambiental de las estrategias, medidas y tecnologías adoptadas

De acuerdo a los resultados obtenidos en las tres etapas anteriores, se cuantifica el impacto ambiental mediante el análisis de huella de carbono a partir de la metodología implementada por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en inglés) utilizando el software SimaPro con el fin de evaluar las emisiones GEI corporativa asociadas al perfil de consumo de energía eléctrica. Esta última etapa se detalla en la Figura 5.



Figura 5. Actividades de la Etapa 4

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del perfil de consumo eléctrico y emisiones GEI en 2018

Durante el año 2018, se realiza un estudio preliminar a partir de los registros históricos de los consumos de energía eléctrica con el propósito de caracterizar el perfil de consumo de Potencia promedio mensual y el impacto ambiental global asociado a emisiones GEI.

3.1.1 Perfil de consumo de energía eléctrica

Los resultados obtenidos teniendo en cuenta los registros de consumo de energía eléctrica de las empresas ESSA y *Vatia* para el año 2018 se presentan en la Tabla 2. Estos se deben a la utilización de equipos por parte de la comunidad educativa, la cual para este periodo corresponde a 830 educandos y 70 personas más que conforman los docentes, administrativos y personal de apoyo. De forma más detallada y teniendo en cuenta que el colegio se distribuye estructuralmente en tres módulos como se aprecia en la Figura 6 y Figura 7.

Tabla 2. Consumo Ponderado de Potencia año 2018

Empresa	Vatia		ESSA	Consumo Total	Consumo Ponderado de Potencia	
	Consumo Mensual	Activa (Kwh)	Reactiva (Kwh)	Activa (Kwh)	Activa (Kwh)	(Kwh)
Enero		472	223	1676	2148	2160
Febrero		263	120	3868	4131	4133
Marzo		1251	854	7603	8854	8895
Abril		2704	1498	4223	6927	7087
Mayo		3009	1587	4629	7638	7801
Junio		2072	1133	4597	6669	6765
Julio		2852	1564	3634	6486	6672
Agosto		3008	1624	4682	7690	7860
Septiembre		2797	1545	4985	7782	7934
Octubre		2676	1601	4316	6992	7173
Noviembre		2404	1274	4324	6728	6848
Diciembre		1042	457	3024	4066	4092



Figura 6. Descripción de la estructura física de la institución

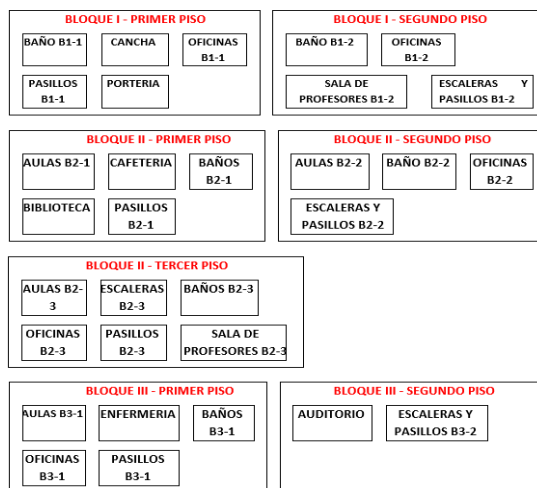


Figura 7. Descripción de las zonas de acuerdo al bloque estructural y el nivel

Cada zona presenta un inventario de equipos eléctricos y sus respectivos consumos de potencia mensual, las cuales se listan teniendo en cuenta que el análisis del perfil energético se realiza en la etapa inicial del proyecto.

3.1.2 Árbol de procesos de acuerdo al consumo de energía eléctrica

Se determina el impacto ambiental global utilizando el método de evaluación IMPACT 2002+ V2.14 empleando el software SimaPro, con el fin de determinar las emisiones GEI asociadas al servicio educativo y relacionadas con el consumo de energía eléctrica durante este proceso. Este análisis se realiza teniendo en cuenta que hay variables cuyos impactos no se evalúan (ocasionados por: el consumo de acueducto, alcantarillado y aseo, las emisiones ocasionadas por reactivos químicos, las emisiones asociadas al

desplazamiento del educando hacia la institución), dado que el enfoque es en la implementación de estrategias pedagógicas y sustitución de luminarias y equipos con mayor eficiencia energética. De acuerdo al árbol de procesos mostrado en la Figura 8, se puede inferir que por el grosor de las líneas Sankey, la zona que mayor incidencia presenta en emisiones GEI es el bloque dos.

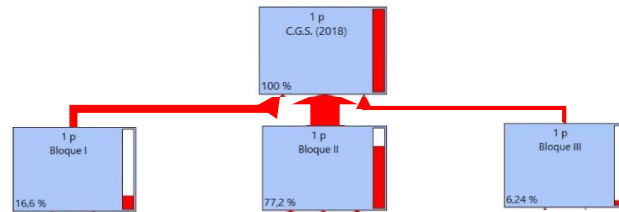


Figura 8. Árbol de procesos de acuerdo al consumo de energía eléctrica

Así mismo, desglosando el árbol de procesos por bloques (bloque I, bloque II y bloque III) y niveles (piso 1, piso 2 y piso 3) se aprecia que las zonas con mayor impacto ambiental durante la prestación del servicio son aquellas donde se desarrollan el proceso académico (aulas de clase y biblioteca) y las oficinas encargadas del trabajo corporativo (Figura 9a, Figura 9b y figura 9c).

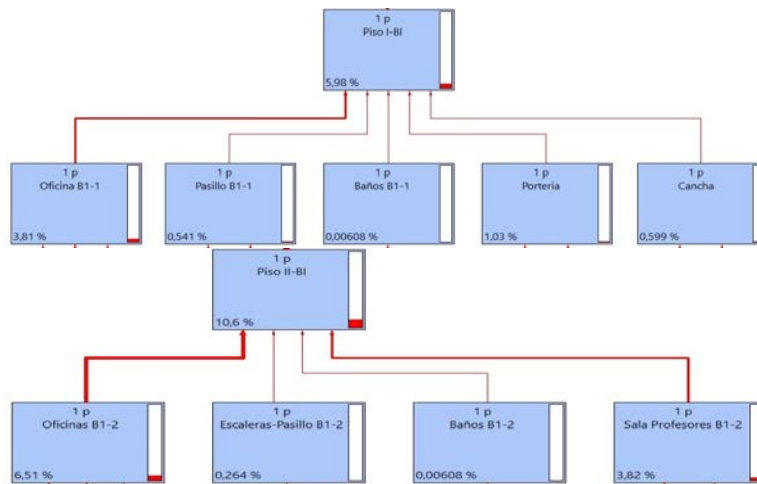


Figura 9a. Árbol de procesos - consumo de energía eléctrica para el Bloque I

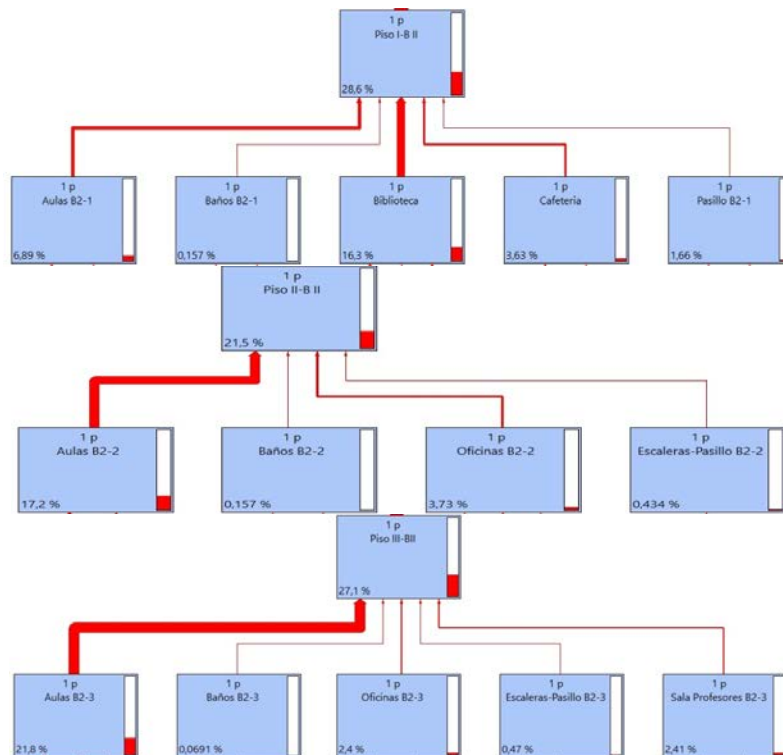


Figura 9b. Árbol de procesos - consumo de energía eléctrica para el Bloque II

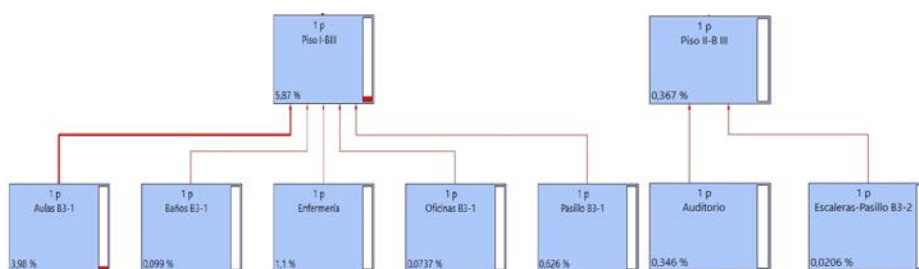


Figura 9c. Árbol de procesos - consumo de energía eléctrica para el Bloque III

3.1.3 Emisiones asociadas de gases de efecto invernadero GEI en 2018

A partir de la lista de equipos eléctricos con sus respectivos consumos de potencia se analiza del Inventario de Ciclo de Vida ICV asociado a las emisiones GEI con el objeto de cuantificar el Impacto Ambiental Potencial IAP en cada bloque durante el año 2018, la cual detalla los impactos ambientales asociados al consumo teniendo en cuenta la matriz energética nacional (Inorgánicos respiratorios (kg PM2.5 eq), Calentamiento Global (kg CO2 eq) y Energía no renovable (MJ primary)), Figura 10.

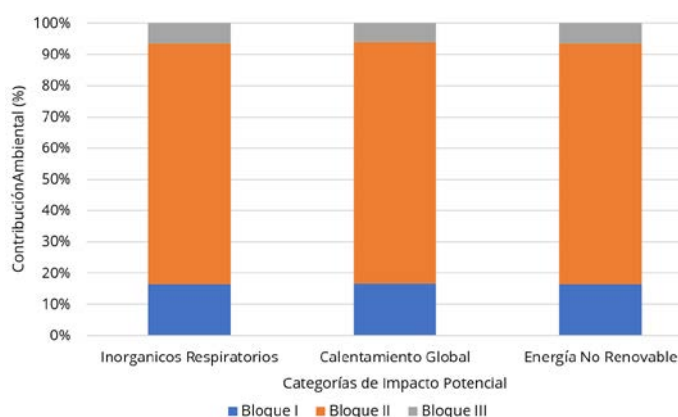


Figura 10. Categorías de Impacto Potencial Vs Contribución porcentual 2018 asociado al consumo de energía eléctrica

Desde un análisis particular, el impacto ambiental de forma ponderada indica la carga ambiental promedio anual de un ciudadano (mPt), se cuantifica (Tabla 3) y representa el Impacto Ambiental Potencial (IAP) para cada categoría y durante esta etapa inicial (Figura 11), la cual representa el bloque dos como la zona de más impacto asociado a la categoría de Calentamiento Global.

Tabla 3. Evaluación del Impacto Ambiental a partir de la ponderación de las categorías de impacto asociada a Matriz Energética Colombiana de 2018

Categoría de impacto	Unidad	Bloque I		Bloque II		Boque III		Total	
			%		%		%		%IAP
Inorgánicos Respiratorios	mPt	6,343	12,2	29,898	12,4	2,502	12,8	63,364	12,4
Calentamiento Global	mPt	35,953	69,3	166,415	69,0	13,242	67,9	353,900	68,9
Energía No Renovable	mPt	9,555	18,4	45,036	18,7	3,768	19,3	95,447	18,7

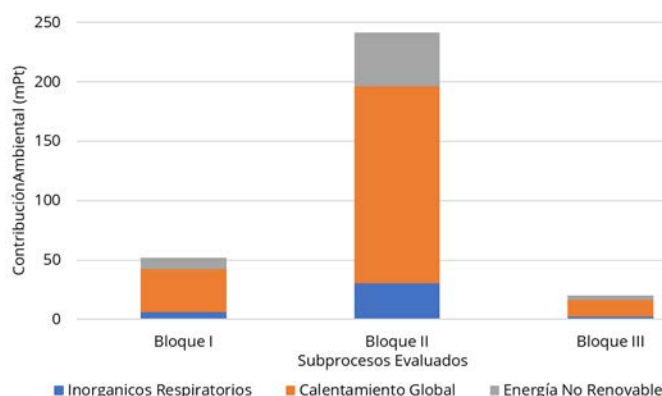


Figura 11. Categorías de Impacto Potencial por subprocesos Vs %IAP 2018 asociado al consumo de energía eléctrica

Por otra parte, las sustancias químicas contaminante asociadas a las emisiones GEI para cada una de los perfiles de las categorías de impacto relacionadas en la Tabla 3. Demostrándose una vez más, que el bloque II es la zona de mayor participación en la emisión de Óxido de Nitrógeno (Figura 12a) y Dióxido de Carbono (Figura 12b) a partir de combustibles fósiles (Figura 12c), sustancias asociadas a las emisiones de GEI.

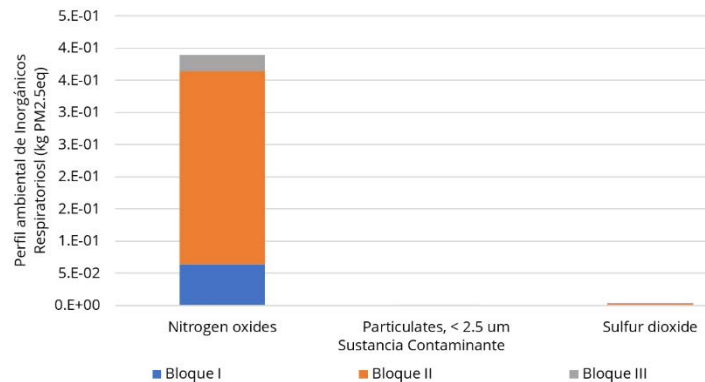


Figura 12a. Perfil Ambiental de Inorgánicos respiratorios Vs Sustancia contaminante 2018

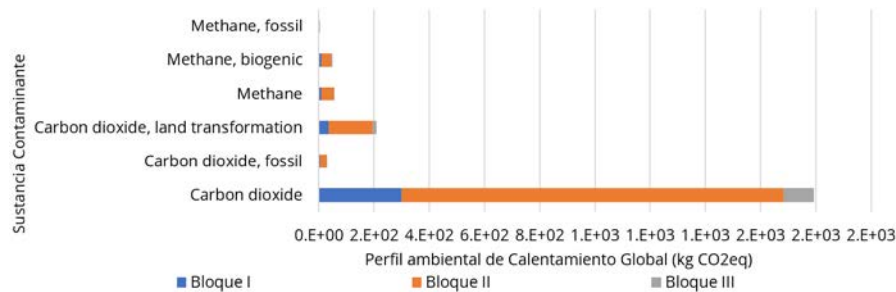


Figura 12b. Perfil Ambiental de Calentamiento Global Vs Sustancia contaminante 2018

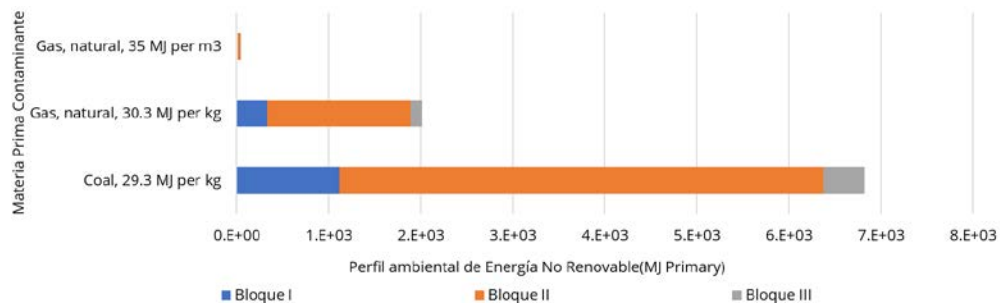


Figura 12c. Perfil Ambiental de Energía No Renovable Vs Materia prima contaminante 2018

Por último, al analizar la contribución de la energía eléctrica de acuerdo a los subprocesos que se plantean, el requerimiento para esta etapa preliminar corresponde a los datos de la Figura 13.

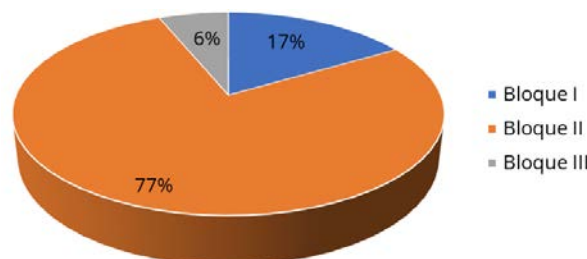


Figura 13. Requerimiento de energía eléctrica de acuerdo a los bloques estructurales en 2018

3.2 Estrategias con enfoque ambiental, Caracterización del perfil de consumo y emisiones GEI en el periodo A-2019

Durante el primer período académico del año 2019 (se denomina A-2019), se ejecuta un plan de actividades desde el proyecto ambiental escolar con el fin de fortalecer los valores ambientales y sociales, los cuales

están establecidos a partir de los lineamientos del Ministerio de Educación Nacional (MEN). La promoción de buenas prácticas permite el uso eficiente de equipos que funcionan con energía eléctrica, reduciendo el tiempo de utilización de los mismos por parte de la comunidad educativa.

3.2.1 Perfil de consumo de energía eléctrica después de implementar las estrategias pedagógicas A-2019

Los resultados obtenidos teniendo en cuenta los registros de consumo de energía eléctrica de las empresas ESSA y *Vatia* para el año 2019 se presentan en la Tabla 4. Estos se deben cuando la comunidad está conformada por 1111 personas (1033 educandos y 78 planta operativa).

Tabla 4. Consumo Ponderado de Potencia año 2019

Empresa	Vatia		ESSA	Consumo Total	Consumo Ponderado de Potencia
	Activa (Kwh)	Reactiva (Kwh)	Activa (Kwh)	Activa (Kwh)	(Kwh)
Enero	1992	1043	1480	3472	3625
Febrero	3356	1622	4772	8128	8288
Marzo	3660	1981	5772	9432	9638
Abril	3004	1642	4609	7613	7788
Mayo	4198	2301	5522	9720	9989
Junio	2477	1470	4616	7093	7244
Julio	3081	1689	3896	6977	7179
Agosto	3327	1734	4835	8162	8344
Septiembre	3468	1604	5086	8554	8703
Octubre	3124	1596	4962	8086	8242
Noviembre	2534	1302	4814	7348	7462

3.2.2 Emisiones asociadas de gases de efecto invernadero (GEI) en el período A-2019

Los perfiles de consumo varían respecto al período anterior, dado que se ejecutaron actividades pedagógicas orientadas al uso racional y eficiente de la energía a partir de la transversalización con el PRAE.

Se realiza el Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) asociado a las emisiones GEI teniendo en cuenta las modificaciones de tiempo de consumo, con el objeto de estimar el Impacto Ambiental Potencial (IAP) en cada bloque (Tabla 5) siguiendo la misma metodología de la etapa preliminar, en la cual se presentan los impactos ambientales asociados al consumo teniendo en cuenta la matriz energética nacional (Inorgánicos respiratorios, Calentamiento Global y Energía no renovable), Figura 14.

Tabla 5. Evaluación del Impacto Ambiental a partir de la ponderación de las categorías de impacto asociada a Matriz Energética Colombiana del período A-2019

Categoría de impacto	Un.	Bloque I	%	Bloque II	%	Bloque III	%	Total	%IAP Total
Inorgánicos Respiratorios	mPt	5,6787	12,5	31,279	12,6	2,3413	12,6	64,349	12,6
Calentamiento Global	mPt	31,2140	68,7	170,74	68,5	12,6765	68,4	351,85	68,5
Energía No Renovable	mPt	8,5540	18,8	47,117	18,9	3,5268	19,0	96,932	18,9

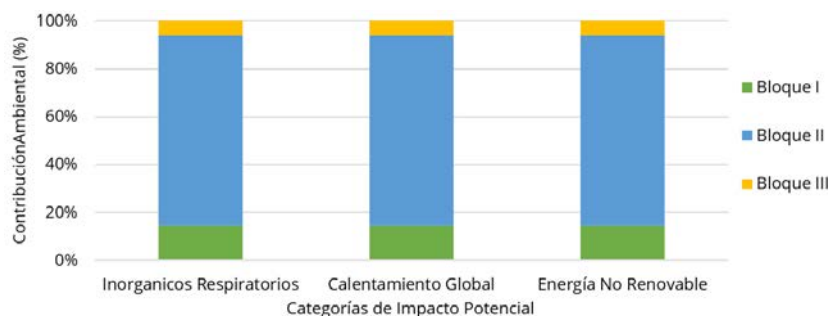


Figura 14. Categorías de Impacto Potencial Vs Contribución porcentual período A-2019

Desde la misma manera, se estima el impacto ambiental de forma ponderada indica la carga ambiental promedio anual de un ciudadano (Tabla 5 y Figura 15), la cual representa el bloque dos como la zona de más impacto asociado a la categoría de Calentamiento Global.

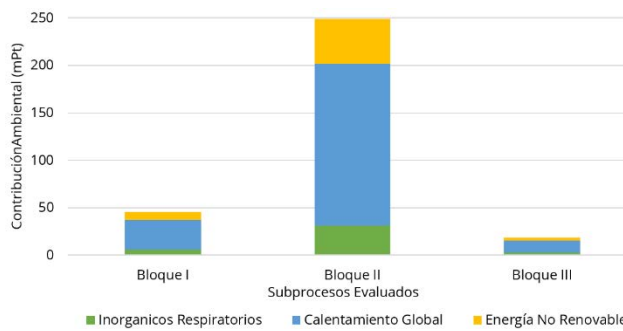


Figura 15. Categorías de Impacto Potencial por subprocesos Vs %IAP período A-2019 asociado al consumo de energía

Los resultados donde relacionan las sustancias químicas contaminante asociadas a las emisiones GEI para cada uno de los perfiles de las categorías de impacto se aprecian en la Figura 16a, Figura 16b y Figura 16c.

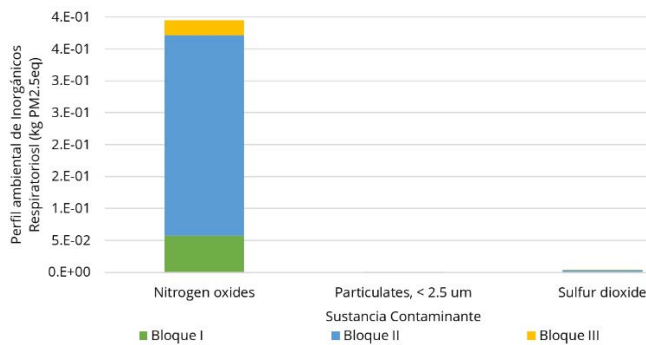


Figura 16a. Perfil Ambiental de Inorgánicos respiratorios Vs Sustancia contaminante período A-2019

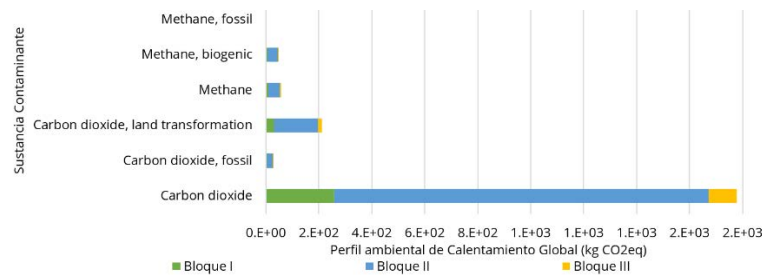


Figura 16b. Perfil Ambiental de Calentamiento Global Vs Sustancia contaminante período A-2019

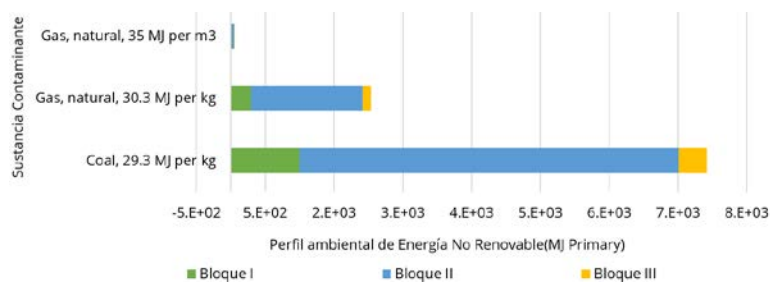


Figura 16c. Perfil Ambiental de Energía No Renovable Vs Materia prima contaminante período A-2019

Finamente, la contribución de energía eléctrica de acuerdo a los subprocesos que se plantean, el requerimiento para el período A-2019 corresponde a:

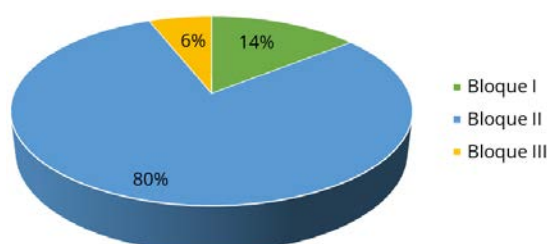


Figura 17. Requerimiento de energía eléctrica de acuerdo a los bloques estructurales en el período A-2019

Es conveniente afirmar que a pesar de presentar un incremento del consumo de energía eléctrica respecto al año 2018, esto se debe al aumento de estudiantes matriculados y personal administrativo y docente contratado para el año 2019 (Tabla 6), para lo cual el consumo per cápita disminuye.

Tabla 6. Comunidad educativa durante 2018 y 2019

Meses a Analizar	Estudiantes		Personal		Total Comunidad Educativa	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Marzo, Abril y Mayo	830	1.033	70	78	900	1.111
Julio, Agosto, Septiembre y Octubre	824	1.029	70	78	894	1107

3.3 Sustitución de equipos y luminarias por unas más eficientes, Caracterización del perfil de consumo y emisiones GEI en el periodo A-2019

Para el segundo semestre del año 2019 (se denomina B-2019) se evalúan los impactos ambientales los meses posteriores a las medidas adoptadas relacionadas con el mantenimiento preventivo, correctivo y cambios de luminarias halógenas por tipo LED. Una vez realizadas estas modificaciones, se el Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) asociado a las emisiones GEI siguiendo la misma metodología de los dos periodos evaluados anteriormente.

3.3.1 Perfil de consumo de energía eléctrica de acuerdo al cambio luminarias y aire acondicionado adoptadas durante el período B-2019

Se realiza el perfil de consumo teniendo en cuenta el resultado del procedimiento de mantenimiento preventivo y correctivo, el cual arrojó el cambio de luminarias halógenas por LED, mantenimiento preventivo de aires acondicionados y cambio del aire acondicionado que se encuentra en la biblioteca. El periodo B-2019 corresponde al seguimiento realizado durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

3.3.2 Emisiones asociadas de gases de efecto invernadero (GEI) en el período B-2019

La evaluación de impacto asociado al período del año B-2019 de acuerdo a las categorías de impacto ambiental, Inorgánicos respiratorios, Calentamiento Global y Energía no renovable con su respectiva contribución porcentual se representa en la Figura 18.

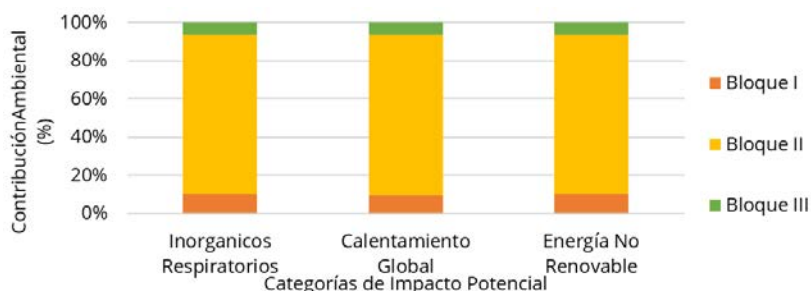


Figura 18. Categorías de Impacto Potencial Vs Contribución porcentual período B-2019

Así mismo, el impacto ambiental estimado de forma ponderada asociado a la categoría de Calentamiento Global se aprecia en la Tabla 7 y gráficamente se representa en la Figura 19.

Tabla 7. Evaluación del Impacto Ambiental a partir de la ponderación de las categorías de impacto asociada a Matriz Energética Colombiana del período B-2019

Categoría de impacto	Un.	Bloque I	%	Bloque II	%	Bloque III	%	Total	%IAP Total
Inorgánicos Respiratorios	mPt	3,7733	13,2	30,5313	12,5	2,3413	12,6	36,646	12,6
Calentamiento Global	mPt	19,0761	66,9	167,297	68,6	12,6765	68,4	199,050	68,4
Energía No Renovables	mPt	5,6838	19,9	45,9903	18,9	3,5268	19,0	55,201	19,0

La relación entre las sustancias químicas contaminante asociadas a las emisiones GEI para cada uno de los perfiles de las categorías de impacto se aprecian en la Figura 20a, Figura 20b y Figura 20c

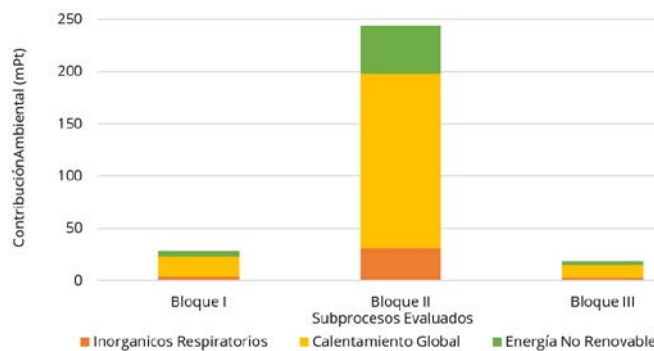


Figura 19. Categorías de Impacto Potencial por subprocesos Vs %IAP período B-2019 asociado al consumo de energía

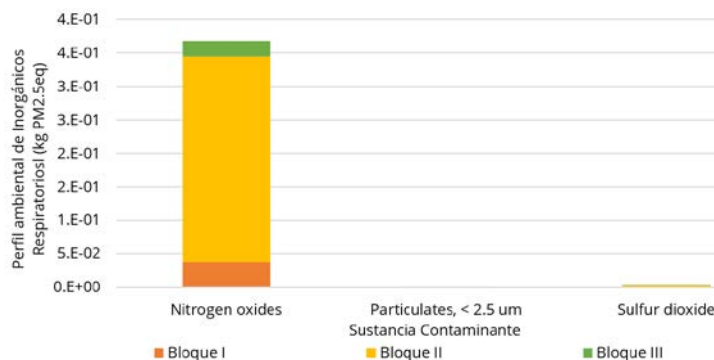


Figura 20a. Perfil Ambiental de Inorgánicos respiratorios Vs Sustancia contaminante período B-2019

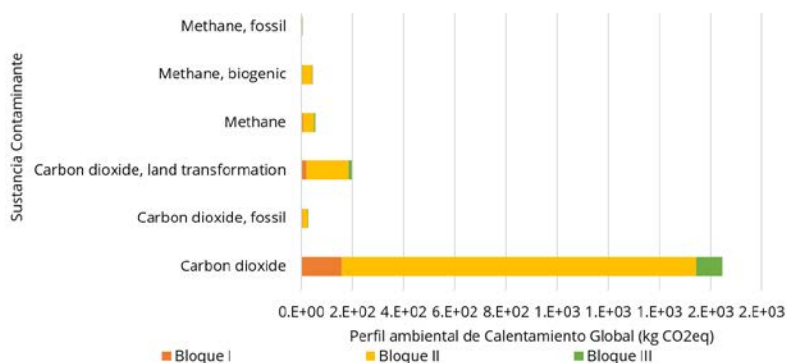


Figura 20b. Perfil Ambiental de Calentamiento Global Vs Sustancia contaminante período B-2019

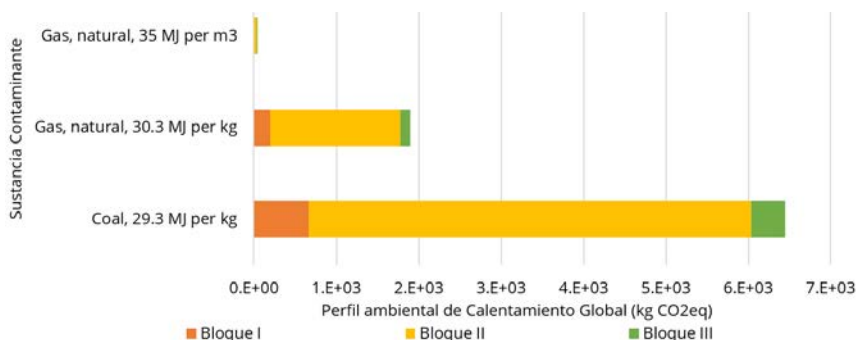


Figura 20c. Perfil Ambiental de Energía No Renovable Vs Materia prima contaminante período B-2019

Por último, el requerimiento de energía eléctrica para el período B-2019 corresponde a la Figura 21.

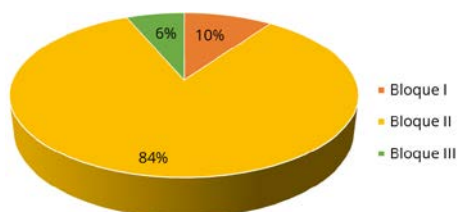


Figura 21. Requerimiento de energía eléctrica de acuerdo a los bloques estructurales en el período B-2019

3.4 Evaluación ambiental de las estrategias adoptadas

3.4.1 Análisis del impacto ambiental potencial de las estrategias adoptadas

Los resultados del Impacto Ambiental Potencial IAP a partir de la carga ambiental promedio anual en cada una de las categorías durante cada período de tiempo evaluado teniendo en cuenta la cantidad de personas que hacen parte de la comunidad educativa (calculado per cápita del IAP) se pueden apreciar en la Tabla 8 y en la Figura 22a y Figura 22b.

Tabla 8. Evaluación del Impacto Ambiental a partir de la ponderación de las categorías de impacto asociada a Matriz Energética Colombiana para cada uno de los períodos

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)
Respiratory inorganics	mPt	38,742452	39,299409	36,645844
Global warming	mPt	215,60904	214,63816	199,0503
Non-renewable energy	mPt	58,359046	59,198008	55,200855
Total	mPt	312,710538	313,135577	290,896999
Impacto Ambiental Global Per cápita	mPt	0,35	0,28	0,26
% Per cápita Impacto Ambiental Global		39	32	29

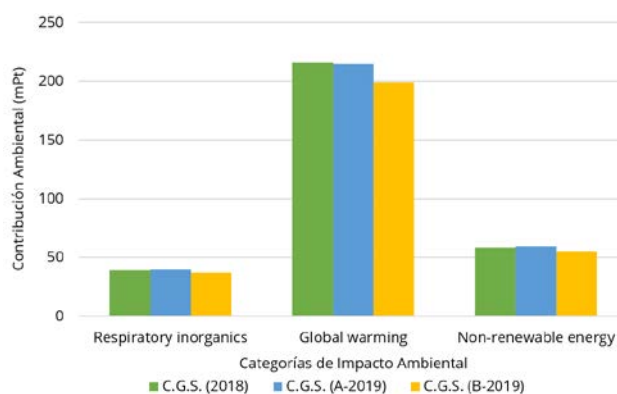


Figura 22a. Contribución ambiental asociado al consumo de energía eléctrica Vs Categorías de Impacto Ambiental

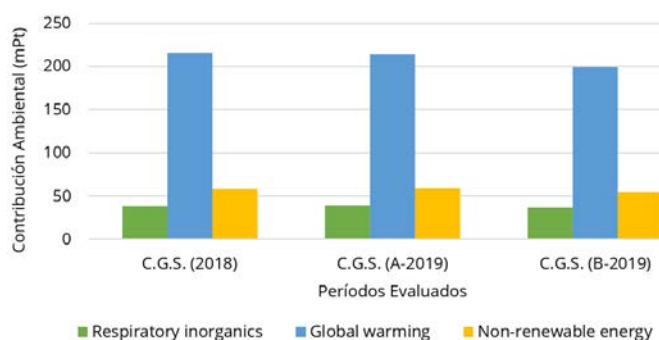


Figura 22b. Contribución ambiental asociado al consumo de energía eléctrica Vs Períodos evaluados

Del mismo modo, el análisis de las sustancias contaminantes asociados a las emisiones GEI para cada una de las categorías de impacto en cada fase del proyecto. Para Inorgánicos respiratorios se detallan en la Tabla 9, Figura 23a y Figura 23b; para Calentamiento Global en la Tabla 10, Figura 23c y Figura 23d, y para Energía No renovable en la Tabla 11 y Figura 23e; teniendo en cuenta el per cápita de cada uno.

Tabla 9. Evaluación de las sustancias asociadas a las emisiones GEI relacionadas con la categoría Inorgánicos respiratorios durante los tres períodos evaluados

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)
Nitrogen oxides	kg PM2.5 eq	0,38920548	0,39480065	0,36814302
Particulates, < 2.5 um	kg PM2.5 eq	2,91899E-06	2,96095E-06	2,76102E-06
Sulfur dioxide	kg PM2.5 eq	0,003318944	0,003366656	0,003139334
Total	kg PM2.5 eq	0,392527343	0,398170267	0,371285115
Categoría Inorgánicos respiratorios Per cápita	kg PM2.5 eq	0,00044	0,00036	0,00034

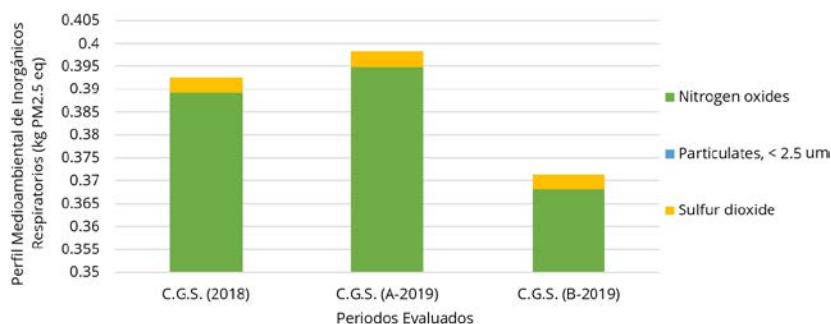


Figura 23a. Perfil Ambiental de Inorgánicos respiratorios Vs Sustancia contaminante durante los períodos evaluados

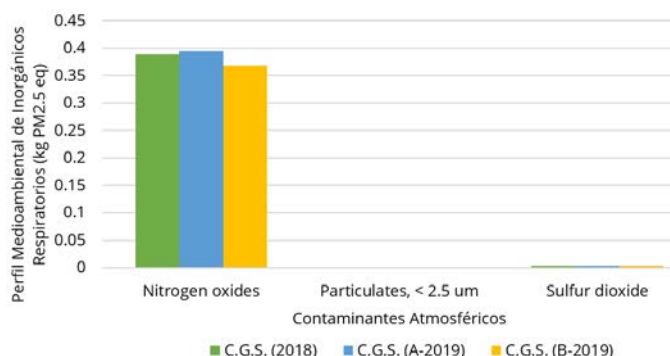


Figura 23b. Perfil Ambiental de Inorgánicos respiratorios Vs Sustancia contaminante durante los períodos evaluados

Tabla 10. Evaluación de las sustancias asociadas a las emisiones GEI relacionadas con la categoría Calentamiento global durante los tres períodos evaluados

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)
Carbon dioxide	kg CO2 eq	1792,9049	1778,378	1647,4561
Carbon dioxide, fossil	kg CO2 eq	28,377448	28,785399	26,841758
Carbon dioxide, land transformation	kg CO2 eq	207,93593	210,92519	196,68315
Carbon monoxide, fossil	kg CO2 eq	0,16282427	0,16516501	0,15401278
Dinitrogen monoxide	kg CO2 eq	0,19217674	0,19493945	0,1817768
Methane	kg CO2 eq	56,504593	57,316896	53,446759
Methane, biogenic	kg CO2 eq	48,121892	48,813687	45,517701
Methane, fossil	kg CO2 eq	0,54311935	0,55092716	0,5137276
Total	kg CO2 eq	2134,742883	2125,130204	1970,794985
Categoría Calentamiento Global Per cápita	kg CO2 eq	2,37	1,91	1,78

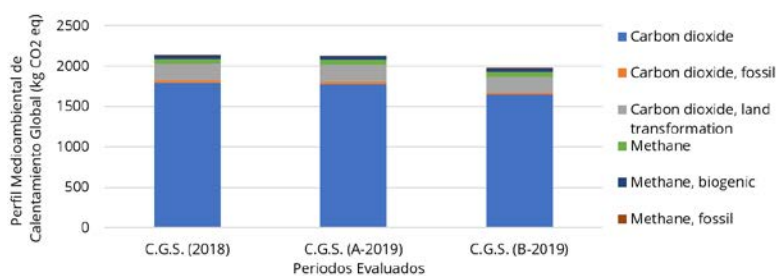


Figura 23c. Perfil Ambiental de Calentamiento Global Vs Sustancia contaminante durante los períodos evaluados

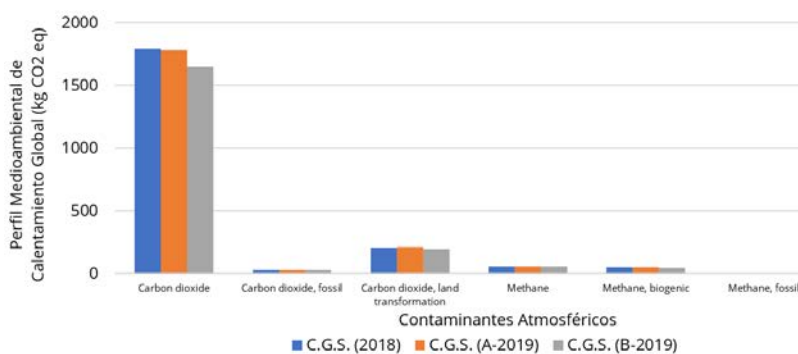


Figura 23d. Perfil Ambiental de Calentamiento Global Vs Sustancia contaminante

Tabla 11. Evaluación de las sustancias asociadas a las emisiones GEI relacionadas con la categoría Energía No Renovable en el GSEB durante los tres periodos evaluados

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)
Coal, 29.3 MJ per kg	MJ primary	6817,3225	6915,3275	6448,3925
Gas, natural, 30.3 MJ per kg	MJ primary	2011,4431	2040,3594	1902,5907
Gas, natural, 35 MJ per m3	MJ primary	40,390284	40,970929	38,204501
Total	MJ primary	8869,155884	8996,657829	8389,187701
Categoría Energía No Renovable Per cápita	MJ primary	9,85	8,10	7,58

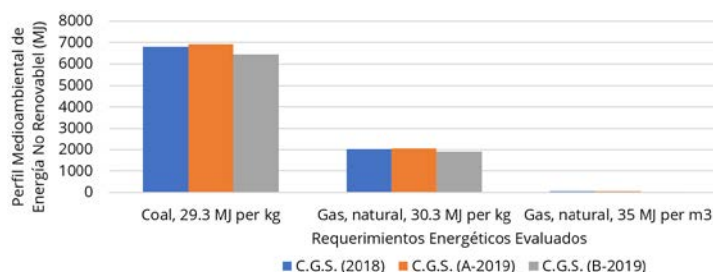


Figura 23e. Perfil Ambiental de Energía No Renovable Vs Materia prima

Por último, el requerimiento de energía eléctrica para los periodos evaluados corresponde a la Figura 24.

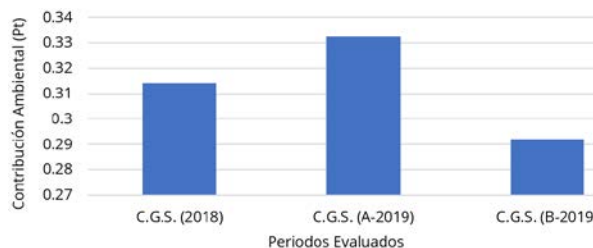


Figura 24. Ponderación del requerimiento energético normalizado durante el período evaluado

3.4.2 Análisis de huella de carbono

El análisis de huella de carbono a partir de la metodología IPCC, permite estimar las emisiones y eliminaciones GEI corporativo. Teniendo en cuenta los tres periodos evaluados se obtienen los siguientes resultados para el estimado de emisiones de CO₂ a 20 años (Tabla 30a) y a 100 años (Tabla 30b), cuyos comparativos se representan en la Figura 25.

Tabla 30a. Evaluación de la Huella de Carbono del GSEB a 20 años

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)	Disminución 2018 - B-2019	%
IPCC GWP 20a	kg CO ₂ eq	3489,0147	3498,8708	3251,7783	237,2364	6,8
Per cápita de emisiones de kg CO ₂		3,88	3,15	2,94	0,939	24,2

Tabla 30b. Evaluación de la Huella de Carbono del GSEB a 100 años

Categoría de impacto	Unidad	C.G.S. (2018)	C.G.S. (A-2019)	C.G.S. (B-2019)	Disminución 2018 - B-2019	%
IPCC GWP 100a	kg CO ₂ eq	2533,2437	2529,3598	2347,7303	185,5134	7,3
Per cápita de emisiones de kg CO ₂		2,81	2,46	2,28	0,535	19,0

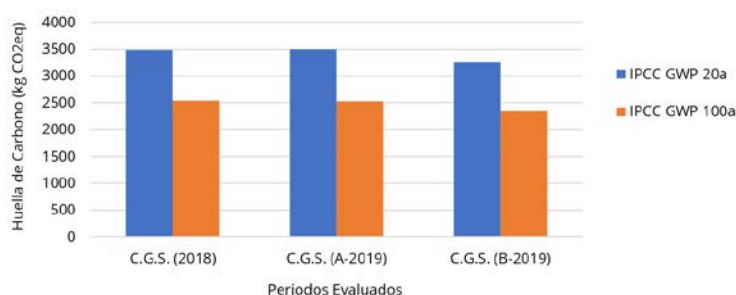


Figura 25. Comparativo de Huella de Carbono a 20 años y 100 años de acuerdo a las implementaciones adoptadas

4. CONCLUSIONES

Con base en el perfil de consumo de energía eléctrica y las emisiones GEI asociadas, se demuestra que las áreas de mayor impacto ambiental potencial corresponden a las aulas de clase y oficinas donde se desarrollan los objetivos misionales de la institución educativa.

La implementación de buenas prácticas ambientales y la ejecución de procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo permite la reducción de consumo de energía eléctrica per cápita y las emisiones GEI corporativas asociadas por este concepto, dado que estas estrategias permitan cumplir los alcances del Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS No. 13 Acciones por el Clima.

La sustitución de equipos eléctricos con mayor eficiencia (luminarias halógenas por LED y aire acondicionado) es una actividad que hace posible una reducción significativa en el consumo de energía eléctrica, en el impacto ambiental global y en la huella de Carbono Corporativa, cumpliendo los lineamientos del ODS No. 7, pues al mejorar la infraestructura energética de la institución se aporta a los avances modernos y sostenibles del país.

El ejecutar actividades económicas sostenibles y amigables con el medio ambiente aporta positivamente en acciones contra el calentamiento global y el clima.

REFERENCIAS

- [1] G. Leon y H. Benavides, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM,» 2007. Recuperado: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=9059>
- [2] F. Schlegel y A. Chiappini, «Food and Agriculture Organization of the United Nations,» 1996. Recuperado: <http://www.fao.org/3/ap440s/ap440s.pdf>
- [3] J. Yin, J. Overpeck, C. Peyser y R. Stouffer, «Geophysical Research Letters banner,» 16 01 2018. Recuperado: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL076500>
- [4] Naciones y Unidas, «United Nations Climate Change,» 12 12 2015. Recuperado: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf
- [5] M. Ayuso, «ACV Alma, Corazón y Vida,» 01 06 2016. Recuperado: https://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2016-06-01/peligro-aire-acondicionado-cambio-climatico-emisiones-energia_1209828/
- [6] Parra y J. Andrade, «Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático,» UPME, Bogotá, 2019.
- [7] XM S.A. E.S.P, «Informe General del Mercado Mayo 2021,» 2021.
- [8] PNUD, «Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo,» 20 06 2012. Recuperado: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/background.html>
- [9] Steep, «Camara de Comercio de España,» 15 Febrero 2017. Recuperado: https://www.camara.es/sites/default/files/generico/steep_training_material_for_smes_spanish_0.pdf
- [10] M. Bonilla, H. Herrera y Y. Puertas, «UPME - Factores de Emisión del Sistema Interconectado Nacional Colombia - SIN.,» 10 2017. Recuperado: <http://fenalco.com.co/sites/default/files/upme2.pdf>
- [11] A. Pulido, R. Jiménez, J. Turriago y J. Mendoza, «Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Colombia,» 2015. Recuperado: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf
- [12] SIAC, «Sistema de Información Ambiental de Colombia,» 20 11 2019. Recuperado: <http://www.siac.gov.co/climaticogei>

Impacto de la gestión del riesgo en las instituciones de salud: Una revisión de literatura

Natalia García Corrales¹

Elisa del Carmen Navarro Romero²

Luisa Fernanda Pastrana Fuerte³

Óscar Mauricio Gelves⁴

^{1,3}*Environment & Technology Foundation*

²*Pontificia Universidad Javeriana*

⁴*Universidad Militar Nueva Granada*

Colombia

Ante el común entendimiento de que el riesgo es un efecto de la incertidumbre y que se establece de la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia de un evento y las consecuencias generadas por este [1], se puede explicar la necesidad de gestionarlo. La gestión del riesgo tiene sus inicios en la gestión de la mitigación de los riesgos existentes, los cuales se desarrollan en la sociedad para la atención de desastres [2]. De acuerdo con la norma ISO 3100, la gestión de riesgo se define como *actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al riesgo* [3]. El riesgo aparece en el argot de las organizaciones, ante el efecto de la incertidumbre, en cualquier contexto, sector económico y tamaño [4]. Durante las últimas dos décadas la gestión de riesgo ha tomado relevancia en el panorama organizacional, como un eje articulador en los sistemas empresariales [5]. Dentro de los factores que se destacan por el auge de la gestión de riesgo se puede mencionar a los financieros, económicos y competitivos [6, 7], dentro de los que se destacan: la globalización de mercados, TIC, clientes más exigentes, el crecimiento de la mortalidad empresarial y presiones de los inversionistas. Hoy en día, las organizaciones enfrentan diversos riesgos operativos al ejecutar sus procesos comerciales y los entornos empresariales son cada vez más complejos y dinámicos. Tomando una perspectiva de riesgo en la gestión de procesos de las instituciones, el ciclo de vida ha sido reconocido como un flujo de investigación esencial para el entendimiento de los procesos, en especial de aquellos del sector salud.

¹ Ingeniera Industrial, Especialista en Gerencia de Proyectos, Especialista en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo y Magíster en Administración. Directora estratégica de Environment & Technology Foundation. Coordinadora del Grupo de Investigación de Sostenibilidad y Competitividad. Profesora cátedra de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería.

Contacto: etf@environmenttechnologyfoundation.org

² Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial con énfasis en Gestión Organizacional.

Contacto: naelisa@javeriana.edu.co

³ Ingeniera Industrial.

Contacto: luisafuerte27@gmail.com

⁴ Ingeniero Industrial y Magíster en Ingeniería de dirección industrial.

Contacto: oscar.gelves@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década, la inclusión del pensamiento basado en riesgos en las normas de la International Organizations of Standardization ISO, ha proporcionado un marco de referencia para el abordaje de la gestión de riesgo en las organizaciones a nivel mundial, así como un entendimiento de visión integral en articulación con la mejora continua y el enfoque basado en procesos [8]. La importancia de la gestión del riesgo en las organizaciones guarda relación con la capacidad que tienen de alcanzar sus objetivos, toda vez que se logra eficacia en la consecución de la estrategia, ya que se involucra a todos los miembros de la organización, independientemente del rol que desempeñan, convirtiéndose en parte esencial de la cultura.

Estos resultados sobre el cumplimiento de los objetivos traen consigo un ambiente propicio para la planificación y la alineación estratégica en todos los niveles. Así mismo, la gestión de riesgo contribuye en los procesos de seguimiento y control de la organización, que conducen a una mejora de la eficacia y la eficiencia operacional. Al mismo tiempo, se constituye en un elemento articulador en la coordinación de ámbitos organizacionales tales como la gestión de la salud y seguridad en el trabajo, la gestión ambiental, la gestión del conocimiento y la capacidad de adaptación.

Por otra parte, el enfoque de gestión basado en riesgos y oportunidades, garantiza la vigilancia constante de la generación de valor para los interesados, los que se articula con facilidad al mejoramiento continuo de los resultados de las empresas. Los riesgos abordados por las organizaciones se relacionan con su naturaleza y con las prioridades frente a los impactos que la ocurrencia de los eventos significa para el futuro de estas. Para la gestión de estos riesgos, los autores han realizado diferentes clasificaciones que, en algunos casos, están relacionados a las causas y en otros a los factores en donde tienen mayores impactos. Para el desarrollo de este estudio de toma la clasificación de riesgos propuesta en [9]:

- Riesgo estratégico
- Riesgos operativos
- Riesgos de control
- Riesgos financieros
- Riesgos de cumplimiento
- Riesgos tecnológicos
- Riesgo de mercado
- Riesgo de crédito
- Riesgo de patrimonio
- Riesgo personal
- Riesgo político
- Riesgo de imagen

2. MÉTODO

La metodología utilizada fue una revisión sistemática de literatura RSL acerca de la gestión de riesgos en instituciones de salud. En [10] se define la RSL como un tipo de estudios científicos de investigación, clasificadas como secundaria e integrativa, al brindar resultados confiables, válidos y actualizados, basados en evidencias. La investigación estableció un punto de referencia sobre el desarrollo de las instituciones de salud frente a la gestión del riesgo, haciendo énfasis en comprender el tipo de abordaje realizado por las organizaciones, y las técnicas más utilizadas por estas organizaciones en específico. Por último, se identificó los periodos de tiempo y lugares en los que se han mostrado estos desarrollos.

La búsqueda y recuperación de información se delimitó a partir del tema de investigación [11]. Primero, la ecuación de búsqueda se construyó realizando consultas preliminares en las bases de datos, validando la forma en la que se obtenían mayores resultados, incluyéndolas en las búsquedas avanzadas por títulos y en las palabras claves, limitando la consulta al español y el inglés.

En la ecuación de búsqueda, Figura 1, que se estableció se tuvo en cuenta lo planteado en [12]: Risk management AND health institution OR hospital OR clinic AND gestión de riesgos en salud OR gestión de riesgo AND clínica OR hospital OR instituciones de salud.

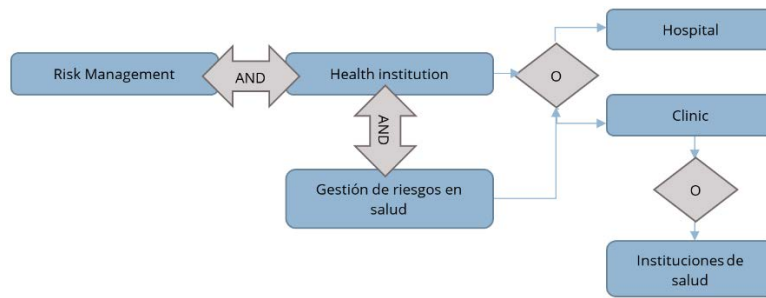


Figura 1. Ecuación de Búsqueda

La consulta se realizó entre el día 9 y 19 de julio de 2020 en fuentes de información primaria como las bases de datos: Ebsco, Pubmed, Science Direct, Taylor&Francis, Redalyc, Springer, Scielo, así como en Google Scholar. Por su parte, la revisión de literatura gris se desarrolló utilizando el motor de búsqueda de Google, introduciendo la misma ecuación definida. Se limita la consulta a los documentos Open Access, y a documentos de texto completo; artículos, libros y capítulos de libro.

Se determinó, no realizar delimitación geográfica ni por fecha de publicación de los documentos, teniendo en cuenta que durante la etapa de construcción y validación de la ecuación de búsqueda se identificó que el universo de información existente no era basto, por ende, se incluyó dentro del alcance de la investigación identificar dos criterios adicionales: países en donde existen mayor cantidad de información disponible; y los años en los que se encuentra literatura, en aras de extraer conclusiones de estos dos análisis.

Los resultados de la consulta se extrajeron mediante descarga en los formatos PDF, nbin, ris bib ó CSV, e integrado a los gestores bibliográficos Mendeley®. Las referencias encontradas, fueron depuradas, al identificar el mismo documento en diferentes fuentes de información (bases de datos), procediendo a eliminar los elementos duplicados. Así mismo, se utiliza Excel® y GeoNames® para organización de la información de síntesis de los resultados, clasificación y para la construcción de figuras que apoyen los resultados y discusión de la investigación. Para realizar el tamizaje de la información, se trabajó con la declaración Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (Prisma) [13], la cual aporta un diagrama de flujo en el que se puede visualizar el desarrollo de la investigación, mejorando su calidad. En la Figura 2 se establece el flujo de tamizaje de la información referente a la investigación, de acuerdo con el enfoque PRISMA ().

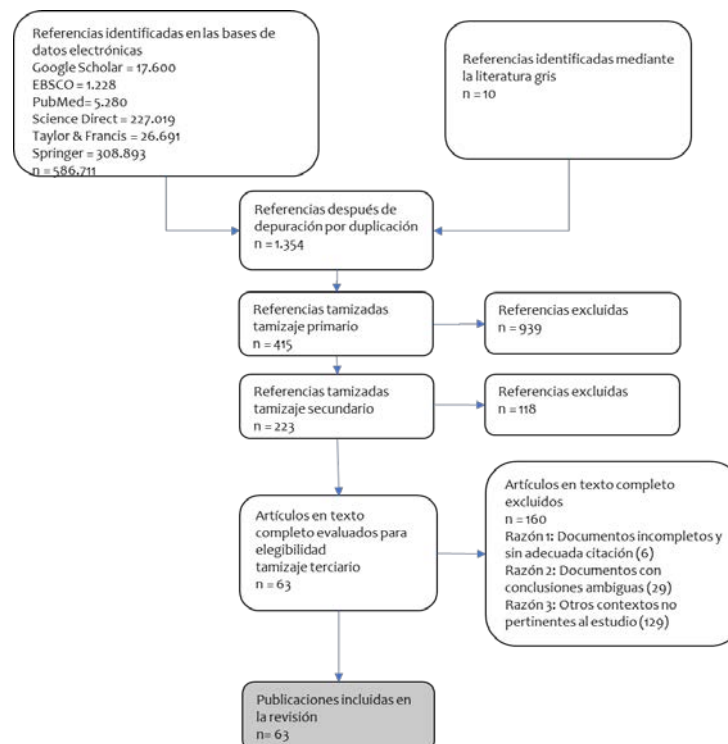


Figura 2. Adaptación del enfoque Prisma para revisiones sistemáticas

La depuración de información se desarrolló en varias etapas. La primera fue de depuración de información, al encontrar las referencias repetidas en varias bases de datos; a partir de ese momento se realiza una etapa de tamizaje en tres niveles, de acuerdo con lo recomendada por la declaración PRISMA [10]: tamizaje primario teniendo en cuenta el título y las palabras claves: el tamizaje secundario, bajo el criterio de revisión de la información contenida en el resumen y, por último, un tamizaje terciario, abordando toda la extensión de las referencias.

Para desarrollar el análisis de la información incluida en las referencias se construyó una base de datos con los 63 documentos que se incluyen en la revisión, utilizando la herramienta Excel®. Se definieron categorías conceptuales de análisis relacionadas con la temática en estudio. Cada referencia fue clasificada según categorías conceptuales de análisis: año de publicación, país de procedencia, fuente de información (base de datos), idioma, técnicas utilizadas y clasificación del riesgo. Debido a que las revisiones sistemáticas deben incluir una síntesis de los datos que se han encontrado, la síntesis de datos puede involucrar resumir los resultados (cuantitativos y/o cualitativos, hallazgos) en tablas, o produciendo resúmenes narrativos, como se muestra a continuación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los documentos analizados y sus referencias, así como su clasificación, se sintetizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de documentos tamizados

Fuente	Título	Año	País	Técnica	Riesgo	Idioma	Referencia
Pubmed	Risk management for the endoscopy center	2002	Estados Unidos	Aplicación de conceptos legales y negligencia	Operativo	Inglés	[14]
Pubmed	Errores de medicación y gestión de riesgos	2003	España	Modelo de Australian Patient Safety Foundation	Operativo	Español	[15]
Science Direct	Puesta en marcha de una unidad de gestión de riesgos clínicos hospitalaria	2005	España	Creación de programa para gestión de riesgos clínicos	Operativo	Español	[16]
Google Scholar	Incidencia de la Ley de autonomía del paciente en la gestión del riesgo sanitario. Nuevas perspectivas legales de la información y la historia	2005	España	Ley de autonomía de paciente 41/2002	Operativo	Español	[17]
Science Direct	Acontecimientos adversos en Medicina Intensiva. Gestionando el riesgo	2006	España	Sistema de notificación de acontecimientos adversos (AA)	Operativo	Español	[18]
EBSCO	A review: a decade of clinical risk management and risk tools	2006	Reino Unido	Gestión basada en la Identificación y análisis de riesgos: matriz de riesgo. Herramientas como: cinco por qué, causa efecto.	Operativo	Inglés	[19]
Taylor&Francis	An Integrated Framework for Risk Management and Population Health	2007	Canadá	Salud pública.	Natural	Inglés	[20]
Science Direct	Sistema de gestión de incidentes críticos y eventos adversos en los ámbitos área, servicio o unidad hospitalarios. Puesta en marcha en tres fases	2008	España	Integración horizontal y vertical del sistema de manejo de incidentes críticos	Operativo	Español	[21]
Science Direct	Estrategia de implantación y evaluación de una unidad funcional de gestión de riesgos sanitarios en un área de atención primaria	2009	España	EFQM modelo europeo autoevaluación y mejora de la calidad	Operativo	Español	[22]
Science Direct	Clinical risk management at the Bambino Gesù Children's Hospital	2009	Italia	Entrenamiento, SI de eventos adversos, Análisis causa Raíz y conferencias	Operativo	Inglés	[23]
Pubmed	Gestione del rischio nelle organizzazioni sanitarie: l'esempio di NephroCare	2009	Alemania	Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act)	Operativo	Inglés	[24]

Science Direct	Implantación de un sistema de gestión de riesgos en obstetricia: Aprendiendo de los errores	2010	España	Registro de sucesos adversos (SA) y Sistema de notificaciones voluntarias (NV)	Operativo	Español	[25]
EBSCO	Assessing hospitals' clinical risk management: Development of a monitoring instrument	2010	Suiza	Instrumento basado en la implementación, objetivos estratégicos y visión	Operativo	Inglés	[26]
Pubmed	Development of an online incident-reporting system for management of medical risk at hospital	2011	Japón	Sistema de notificación de incidentes en línea	Operativo	Inglés	[27]
Springer	Early experience in a breast and ovarian cancer risk management clinic in Malaysia	2012	Australia	Riesgo de cáncer de seno	Operativo	Inglés	[28]
Pubmed	Clinical risk management in hospitals: strategy, central coordination and dialogue as key enablers	2012	Suiza	Factores organizacionales y condiciones estructurales	Operativo	Inglés	[29]
Science Direct	Proposal of an information system to support risk management - the case of the Portuguese hospital center CHTMAD	2012	Brasil	Sistema de información para la identificación y monitoreo del riesgo clínico y no clínico	Operativo	Inglés	[30]
EBSCO	Using COBIT to Aid in Hospital Risk Management	2012	Japón	COBIT <i>Control Objectives for Information and related Technology</i>	Operativo	Inglés	[31]
Google Scholar	Gestión de riesgos en un servicio de Medicina Intensiva: conciliación de la medicación	2013	España	Norma UNE 179003: 2010 y Modelo de Australian Patient Safety Foundation	Operativo	Español	[32]
Google Scholar	De la salud ocupacional a la gestión de la seguridad y salud en el trabajo: más que semántica, una transformación del sistema general de riesgos laborales	2013	Colombia	Gestión del riesgo en el SGSST	Operativo	Español	[33]
Pubmed	A Results-Driven Risk Management Program: One Surgical Group's Success Story	2013	Estados Unidos	Estructura multimodal con un programa educativo	Operativo	Inglés	[34]
Taylor&Francis	Playing the game: service users' management of risk status in a UK medium secure forensic mental health service	2014	Reino Unido	Salud mental	Operativo	Inglés	[35]
EBSCO	Systematic implementation of clinical risk management in a large university hospital: the impact of risk managers	2014	Austria	El papel de los administradores de riesgo	Operativo	Inglés	[36]
EBSCO	Hospital Healthcare Service Risk Assessment and Management with Risk-O-Meter Software Metrics for a Field Application	2014	Estados Unidos	<i>Software Risk-O-Meter (RoM)</i> para la evaluación y mejora de la calidad en la atención de pacientes	Operativo	Inglés	[37]
Pubmed	The German clinical risk management survey for hospitals: Implementation levels and areas for improvement in 2015	2015	Alemania	Encuesta basada en Instrumento de supervisión de Briner y colleagues	Operativo	Inglés	[38]
Google Scholar	Vigilancia Tecnológica para la Gestión del Riesgo en el Sector Salud asociado a la norma ISO 31000	2015	Colombia	ISO 31000	Tecnológico	Español	[39]
Pubmed	Assessment of Clinical Risk Management System in Hospitals: An Approach for Quality Improvement	2015	Canadá	Gestión de calidad	Operativo	Inglés	[40]

EBSCO	The institutional work of hospital risk managers: democratizing and professionalizing risk management	2015	Canadá	El papel de los administradores de riesgos a nivel intra y extra organizacional	Operativo	Inglés	[41]
EBSCO	Risk Management in Hospitals	2015	India	Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA), PDCA, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	Operativo	Inglés	[42]
Google Scholar	Gestión de riesgos en los laboratorios clínicos	2015	Perú	EP23-A Control de calidad en el laboratorio basado en la gestión de riesgos	Operativo	Español	[43]
Springer	Procedures for risk management and a review of crisis referrals from the MindSpot Clinic, a national service for the remote assessment and treatment of anxiety and depression	2015	Australia	Crisis por salud mental	Operativo	Inglés	[44]
Science Direct	Implementation of a risk management plan in a hospital operating room	2015	China	Estándar Australiano de Administración del Riesgo AS/NZS 4360 matriz de cuantificación de riesgos formulario de registro de riesgos	Operativo	Español	[45]
Pubmed	Adverse event reporting and patient safety at a University Hospital: Mapping, correlating and associating events for a data-based patient risk management	2016	Italia	Sistema de reporte de eventos adversos	Operativo	Inglés	[46]
EBSCO	Implementación de la gestión de riesgo en los procesos misionales de la Sección de Dermatología de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia) siguiendo las directrices de la norma ISO 9001:2015	2017	Colombia	ISO 31000 y ISO 9001	Operativo	Español	[47]
Science Direct	Sistema integral de gestión de incidencias en atención primaria: más allá de la seguridad del paciente	2017	España	Gestión de incidencias registradas Google Drive Formularios basado en la Comisión de calidad (CC)	Operativo	Español	[48]
Pubmed	Implicación de las enfermeras en la gestión de riesgos y la seguridad del paciente en atención primaria	2017	España	ISO 9001:2008	Operativo	Español	[49]
Science Direct	Risk Management in Hospital Wards: The Case of Blood Procurement and Handling	2017	Italia	RBS <i>Risk Breakdown Structure</i> . RBM Risk Breakdown Matrix.FMECA Failure Mode and Effects Criticality Analysis	Operativo	Inglés	[50]
Science Direct	Clinical risk management in obstetric practice	2017	Reino Unido	Principio de Identificación y análisis de riesgos	Operativo	Inglés	[51]
Science Direct	Sunway Medical Laboratory Quality Control Plans Based on Six Sigma, Risk Management and Uncertainty	2017	Malasia	<i>Six Sigma</i>	Operativo	Inglés	[52]
Google Scholar	Gestión multicriterio de riesgos operacionales en los procesos clave de una entidad hospitalaria	2018	Cuba	Enfoque multicriterio	Operativo	Español	[53]
Science Direct	An experience in integrated management of clinical risks	2018	España	Modelo de gestión integral de riesgos PUBA British United Provident Association	Operativo	Inglés	[54]

Google Scholar	Metodología con enfoque multicriterio para la gestión de riesgos tecnológicos de Ortopedia en hospitales Methodology with a multicriteria approach for Orthopedics technological risk management in hospitals	2018	Cuba	Enfoque multicriterio	Tecnológico	Español	[55]
Pubmed	Assessing the Health-Care Risk: The Clinical-VaR, a Key Indicator for Sound Management	2018	España	Valor en Riesgo (VaR) y Enfoque de Distribución de Pérdidas (LDA)	Operativo	Inglés	[56]
Pubmed	What should the African health workforce know about disasters? Proposed competencies for strengthening public health disaster risk management education in Africa	2018	África	Educación para atención de desastres	Natural	Inglés	[57]
Science Direct	Methodological proposal for the inter-institutional management of wastes in health care centers in Uruguay	2018	Uruguay	Mejora continua	Natural	Inglés	[58]
Science Direct	ERM for Health Care Organizations: An Economic Enterprise Risk Management Innovation Program (E2 RMhealth care)	2018	Brasil	ERM	Financiero	Inglés	[59]
Google Scholar	Fortalecimiento del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en el Ámbito Psicosocial desde la Perspectiva del Marco Lógico	2018	Colombia	Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el trabajo, Resolución 2646 de 2008	Operativo	Español	[60]
EBSCO	A importância do trabalho coletivo na gestão dos riscos do/no trabalho em saúde	2019	Brasil	Análisis ergonómico del trabajo y trabajo en equipo	Operativo	Inglés	[61]
Taylor&Francis	A proposed enterprise risk management model for health organizations	2019	Brasil	Flujo de caja en riesgo y la variabilidad de los costos e ingresos	Financiero	Inglés	[62]
Science Direct	Variability in the Management Recommendations Given for High-risk Breast Lesions Detected on Image-guided Core Needle Biopsy at U.S. Academic Institutions	2019	Estados Unidos	Survey Monkey para formularios acerca de recomendaciones en el manejo de riesgos	Operativo	Español	[63]
Taylor&Francis	Financing Common Goods for Health: Core Government Functions in Health Emergency and Disaster Risk Management	2019	Internacional	Atención de desastres	Natural	Inglés	[64]
Google Scholar	Análisis de los retos y obstáculos que se presentan a las pymes en Neiva en relación con la gestión del riesgo laboral	2019	Colombia	Riesgo laboral	Operativo	Español	[65]
Science Direct	Risk management in gynaecology	2019	Reino Unido	Mejora continua	Operativo	Inglés	[66]
Science Direct	Risk management in outpatient surgery	2019	Francia	Mejora continua	Operativo	Inglés	[67]
Science Direct	Risk analysis of hospitals using GIS and HAZUS: A case study of Yazd County, Iran	2020	Iran	GIS. Hazus herramienta de análisis de peligros naturales basada	Natural	Inglés	[68]
Google Scholar	Metodología de gestión de riesgo para procesos en una institución de salud previsual	2015	Venezuela	ISO 31000 y el modelo COSO ERM	Financiero y patrimonio	Español	[69]

Google Scholar	Evaluación del riesgo para la seguridad del paciente en establecimientos de salud	2010	Mexico	Evaluación de riesgo para la salud de pacientes	Operativo	Español	[70]
Google	La seguridad del paciente en atención primaria en salud ¿Una actividad que podría quedar en el olvido?	2017	Colombia	Identificación de riesgos y seguridad del paciente	Operativo	Español	[71]
Google	Inclusión para La gestión del riesgo de desastres en hospitales" (INGRID-H)	2018	Internacional	Metodología de "evaluación - acción"	Natural	Español	[72]
Google Scholar	Experiencia en gestión del riesgo en 2 unidades de hospitalización del Hospital Monte Naranco de Oviedo	2005	España	Sistema de riesgos del National Health Service (NHS)	Operativo	Español	[73]
Google Scholar	Gestión integrada de seguridad del paciente y calidad en servicios de salud	2018	Cuba	Gestión de la calidad UNE 179003: 20138 y la NC-ISO 9001: 2015	Operativo	Español	[74]
Google	Metodología AMFE como herramienta de gestión de riesgo en un hospital universitario	2015	Colombia	metodología AMFE	Tecnológico	Español	[75]
Google Scholar	Riesgo psicosocial en el personal de enfermería. Servicio de urgencias en hospital universitario de Cartagena	2015	Colombia	Evaluación de Riesgo Psicosocial SG-SST	Operativo	Español	[76]

Respecto al año de publicación, se observa en la se observa que a partir del año 2015 se han publicado el mayor número de investigaciones acerca de la gestión de riesgo en instituciones de salud, tal y como se muestra en la Figura 3. Este crecimiento en el número de referencias puede entenderse como un avance en el desarrollo de la gestión del riesgo en el sector de servicios de salud, atendiendo a una tendencia que se debe observar en otros sectores económicos.

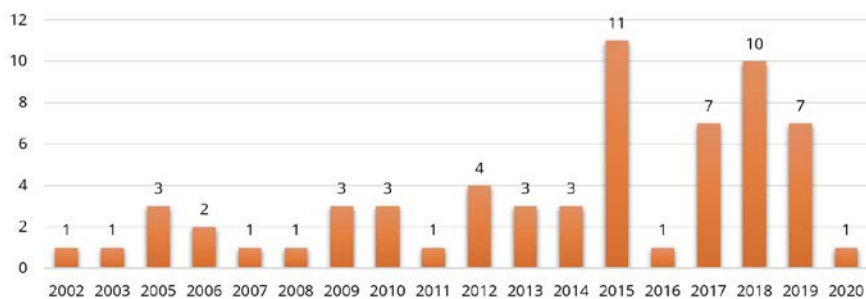


Figura 3. Número de referencias por año

Por su parte, llama la atención los resultados de las referencias por país de procedencia. Para este análisis se utilizó la herramienta de GeoNames de Microsoft integrada a la herramienta Excel. El mapa de procedencia de la información consultada ubica a España como el país con mayor número de investigaciones realizadas con 13, seguida de Colombia con 8, Brasil y Estados Unidos con 4 cada uno. En el continente asiático se observa una leve presencia de investigaciones mientras que en el africano las referencias consultas fueron casi nulas. Los resultados de muestran en la Figura 4.

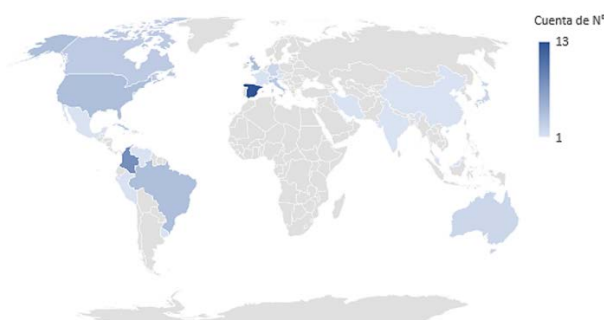


Figura 4. Mapa de procedencia de referencias

Frente a la clasificación realizada a la información se acuerdo con las bases de datos fuente de información, se tuvo algunas consideraciones adicionales. La mayor parte de las referencias que se encontraban repetidas provenían de Google Scholar y Science Direct. En la primera depuración de las referencias se estableció la clasificación en la fuente de información que concediera mayor relevancia (orden de aparición) a la información en la base de datos. La síntesis de los resultados de esta clasificación a las 63 referencias se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2. Referencias según fuente de información encontrada

Fuente	Referencias
Science Direct	19
Google Scholar	14
Pubmed	12
EBSCO	9
Taylor&Francis	4
Google	3
Springer	2
Total	63

Tal y como se muestra en la Tabla 2, se presentan las bases de datos con mayor número de publicaciones, siendo: Science Direct, Pubmed y EBSCO las de mayor frecuencia representando el 63% del total, por otro lado, menos del 20% constituye las referencias encontradas a través del motor de búsqueda Google Scholar. En atención a la clasificación de riesgos de la literatura incluida, se tomó como referente la clasificación realizada por [77]; adicionando el tipo de riesgos naturales. Es decir, la clasificación realizada a las referencias se establece a partir de la problemática resuelta por la investigación referenciada.

La Figura 5 muestra que más del 80% de las publicaciones abordaron la gestión de riesgos operativos que se presentan en las instituciones de salud, de lo que se concluye que la mayoría de las instituciones tienen un particular interés en gestionar los riesgos producto de sus actividades relacionadas con la atención del paciente directamente. Sin embargo, se han preocupado de gestionar otro tipo de riesgo como naturales, tecnológicos y financiero.

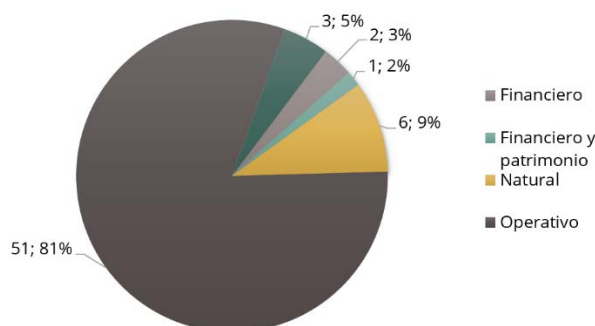


Figura 5. Número de referencias de acuerdo con la clasificación del tipo de riesgo

En relación con el análisis resultante de la clasificación de las referencias de acuerdo con las técnicas utilizadas para la gestión de riesgos en las instituciones de salud, se notó una gran variedad, no encontrando ninguna recurrencia especial en alguna. Sin embargo, se destaca el abordaje a través de reglamentaciones y normativas propias de los países de procedencia de la referencia, y otras relacionadas a la gestión de la calidad y a la gestión de salud y seguridad en el trabajo.

Por último, sobre el idioma en el que se encuentra las referencias tomadas, la clasificación arrojó que el 56% se encuentran en inglés y el 44% en español. En algunos casos, el idioma inglés se presenta como alternativo al portugués, italiano y alemán. Esto refleja una necesidad para los investigadores de países hispanohablantes a desarrollar sus competencias en el dominio del inglés, y mejorar el impacto de las publicaciones.

El análisis de la literatura científica realizado logra mostrar que la gestión del riesgo en diferentes organizaciones de salud ha sido desarrollada adoptando las normas ISO 9001 e ISO 31000: 2011. [34]

describe como la primera función como soporte de la segunda en las fases de gestión de riesgos en la sección de dermatología de la Universidad de Antioquia. De igual manera [49] muestra la gestión del riesgo desde la ISO 9001 acompañado del liderazgo del personal de enfermería en la atención primaria. Esto reafirma la importancia de contar con normas internacionales en materia de gestión de riesgo, y lo determinante de la articulación con los sistemas existentes. Por otro lado, la gestión de riesgos también se ha abordada con modelos como los que establece la norma UNE 179003: 2010, la *Australian Patient Safety Foundation* y el modelo Europeo de Excelencia EFQM, los dos primeros implementados por [18] en un servicio de medicina intensiva y el último por [22] en un área de atención primaria.

También, técnicas como análisis multicriterio han sido de gran ayuda en la gestión de riesgos específicamente durante la evaluación de estos, [53] demuestra su gran utilidad en la priorización, jerarquización de riesgos y toma de decisiones en entidades hospitalarias. Ante la carencia de un marco común internacional, y un lenguaje unificado para la gestión de riesgos para las instituciones de salud, estas han adaptado sus propias metodologías, y en sí, construyendo una visión segmentada de los riesgos, principalmente enfocados a impactos sobre la salud de pacientes y personal. Esto arroja un resultado de investigaciones en las que se aborda el riesgo como un tema inherente a la operación; específicamente resaltan algunas relacionadas con los riesgos para el personal, tales como psicosocial, ergonómico y biológico. Es así, como nota una oportunidad para construir una metodología que involucre una visión integral del riesgo en las organizaciones prestadoras del servicio de salud, a través de la articulación con los sistemas de gestión.

La gestión del riesgo en salud enmarca las acciones necesarias para disminuir la probabilidad de que una persona presente un estado de salud; por ello existen sistemas de salud que se basan en prevención de enfermedades, con una adecuada utilización de los recursos. Se pueden considerar dos frentes, para evaluar el riesgo, uno asociado al riesgo de tener una enfermedad y cómo se pueden impactar para prevenirlas y el segundo, asociado a la prestación de los servicios de salud basados en la política de seguridad de los usuarios, para cada uno de los frentes el responsable es diferente, para el primero responde el paciente, para el segundo es responsabilidad de las entidades prestadoras de salud.

Estos resultados se entienden desde un mundo en constante transformación, en donde la aceleración tecnológica pone a las organizaciones en escenarios de constante cambio. Todas las organizaciones se ven rodeadas de situaciones en donde existen peligros, que puedan materializarse en riesgos [78]. Vale la pena destacar que existen impulsores en el contexto por fuera del alcance de las organizaciones, dentro de los que se pueden mencionar las transformaciones en los hábitos de vida de las personas, los cuales demandan nuevas necesidades para adaptarse a sus estilos de vida, el incremento del número de competidores en casi todos los sectores económicos, la introducción inminente de las TIC, entre otros.

Se requiere, entonces, la formalización en las organizaciones de los métodos para la identificación, valoración y gestión del riesgo, en aras de realizar una atención sistémica de los riesgos, con el propósito de aprovechar las oportunidades y prevenir los efectos negativos potenciales del riesgo, bajo un enfoque de prevención, y no de corrección de las consecuencias.

El proceso de la gestión del riesgo se estructura a través de una secuencia de fases: 1) la identificación y definición del contexto estratégico, para establecer las variables principales para la gestión del riesgo, así como determinar el alcance y los criterios para su abordaje; 2) la segunda fase, la identificación de riesgos, en la cual se identifica de ordenadamente los riesgos a los que está sometido el proceso, a partir de las causas y efectos ante la ocurrencia de los eventos; 3) abarca al análisis de riesgos, en el que se parte de la cuantificación del riesgo y su valoración, desde la probabilidad de ocurrencia del evento y el impacto de este relativo a las consecuencias. Un factor determinante para el éxito en la implementación de la gestión del riesgo es el acceso a información de calidad, extraída en la fase de identificación y definición de las variables clave; en especial al método de captura para el posterior análisis, en especial, la interacción de los procesos. 4) en la cuarta fase se realiza la valoración, bajo la contratación de los resultados versus los controles establecidos. 5) en la etapa cinco, se establecen las políticas de gestión de riesgo, en articulación con las medidas para mitigarlos: transferencia, retención, reducción o evitar el riesgo. Y la última etapa 6) consiste en el monitoreo de los riesgos mediante indicadores de seguimiento.

3.1 Gestión del riesgo en entidades de salud de Colombia

A través de la revisión bibliográfica, enfocándolo en el entorno colombiano, y a partir de los factores que inciden de manera positiva o negativa sobre la salud de las personas pertenecientes a una población, se requieren estudios que coadyuven a fortalecer el enfoque basado en riesgos, para la gestión de las instituciones de salud. Este enfoque se debe establecer a partir de los resultados de los indicadores de salud, que están altamente influenciados por fenómenos sociales, culturales, económicos y ambientales.

De acuerdo con Marc Lalonde [79], existe una relación entre cuatro factores y la salud de una población. A estos factores los denomina campos de la salud, que podrían servir como punto de partida para los estudios en Colombia para mejorar la gestión de riesgo en instituciones de salud:

- Estilos de vida
- Factores medioambientales
- Factores biológicos (biología humana) y hereditarios
- Sistema de asistencia sanitaria

Para próximas investigaciones complementarias se profundizará la bibliografía referente a los aportes en el campo de la gestión del riesgo en las entidades de salud colombianas, y poder establecer una brecha entre los conceptos, lineamientos y políticas que puedan ser contextualizados a las dinámicas del país.

4. CONCLUSIONES

Para la realización de este capítulo, se acudió a la utilización de bases de datos académicas, y se procedió a realizar la ecuación de búsqueda para expresar de una forma exacta los requerimientos de información del objeto de estudio; se utilizó, un lenguaje de intermediación entre la información que se quería obtener versus la información ofertada por las bases de datos. Aunque existen muchas bases de datos a disponibilidad, es importante precisar que fue necesario revisar la operatividad, funcionalidad y campo de acción de las bases de datos, para lograr afinidad de criterios con la investigación.

Para la construcción de la ecuación de búsqueda, se utilizaron palabras clave teniendo en cuenta el objeto de estudio y el marco de la investigación, se incluyeron nombres propios, metodologías, de igual forma se hizo el uso de palabras claves sencillas y compuestas.

Además de las palabras clave, se utilizaron operadores para combinar las palabras y delimitar aún más la investigación. Se utilizaron símbolos reservados como comillas y paréntesis, buscando la mínima ambigüedad posible.

Las instituciones de salud no cuentan con una investigación base que logre establecer una metodología unificada para gestionar el riesgo, y que haya sido replicada en un número importante de organizaciones. Ante esta carencia, las instituciones se encargan de abordar los riesgos operativos (inherentes a su naturaleza) y al cumplimiento de las reglamentaciones impuestas por los gobiernos territoriales. En adición, hay necesidades del manejo de un lenguaje común sobre la gestión de riesgo para las intuiciones de salud, que logren mejorar la transferencia y aplicación de conocimiento en esta materia. Adicionado, a la necesidad de incrementar la literatura en idioma inglés, que mejore la transferencia de la información a más lugares en el mundo.

La gestión de riesgo y su importancia en las organizaciones ha observado un aumento progresivo de producción científica en la última década [7]. La inclusión del pensamiento basado en riesgos en las nuevas normas ISO (9001 y 14001 en el 2015 y 45001 en el 2018) aportarán velocidad al estudio de la gestión de riesgo, incluyendo las investigaciones para instituciones de salud. La dispersión de los desarrollos científicos muestra que no existe un liderazgo claro, o una apuesta de algún país por ahondar en gestión de riesgo en instituciones prestadoras del servicio de salud; aunque vale la pena mencionar que España, y más recientemente Colombia, muestran avances en esta materia. Esto puede ser una oportunidad para los investigadores colombianos, y más ante el escenario de pandemia global generado por el COVID-19 [80].

La gestión de riesgos se ha convertido en una parte integral de la administración hospitalaria en la mayoría de los países desarrollados. Sin embargo, el concepto y el proceso de gestión de riesgos en países en desarrollo aún no se han dado, es requerido que los hospitales administren, implementen y fortalezcan el riesgo para proteger a todos los actores y minimizar pérdidas financieras a las entidades prestadoras.

Se destaca que en cualquier sector o actividad económica en el que se estudie, la importancia de la gestión de riesgo es un asunto determinante en la mejora continua de las organizaciones, puesto que se constituye en un eje articulador entre los interesados, las estrategias, las metas y objetivos, los indicadores y las operaciones. Esto sin olvidar el impacto sobre los resultados financieros y de reputación para las organizaciones prestadoras de salud, que realizan vigilancia e intervención sobre los peligros de una manera integral, reconociendo el impacto que la materialización de los peligros sobre los costos de la organización bien sea por pérdidas o por reparaciones de las consecuencias de los eventos no deseados. Esto redundará, en que la toma de decisiones para las organizaciones debe ser abordada desde una perspectiva de manejo del riesgo, como parte fundamental del proceso directivo.

REFERENCIAS

- [1] B. E. Tocabens, "Definiciones acerca del riesgo y sus implicaciones," *Rev. Cubana Hig. Epidemiol.*, vol. 49, no. 3, pp. 470-481, 2011.
- [2] G. I. Gellert de Pinto, "El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo," *Boletín Científico Sapiens Res.*, vol. 2(1), no. 2215-9312, pp. 13-17, 2012.
- [3] *NTC-ISO:31000*, Norma Técnica Colombiana Ntc-Iso 31000. 2011.
- [4] D. Brito Gómez, "El riesgo empresarial," *Univ. y Soc.*, vol. 9, no. 2, pp. 247-252, 2018.
- [5] M. L. Castañeda Muñoz and J. A. Sánchez Prieto, "Gestión del riesgo como eje articulador de un sistema de gestión integrado en las pymes," *SIGNOS - Investig. en Sist. gestión*, vol. 8, no. 2, p. 119, 2017.
- [6] R. Martínez Hernández and M. I. Blanco Dopico, "Gestión de riesgos: reflexiones desde un enfoque de gestión empresarial emergente," *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 22, no. 80, p. 693, 2018.
- [7] J. Hasper Tabares, J. Correa Jaramillo, M. Benjumea Arias, and A. Valencia Arias, "Tendencias en la investigación sobre gestión del riesgo empresarial: un análisis bibliométrico," *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 22, no. 79, p. 506, 2017.
- [8] J. Riascos González, "De la estructura por funciones al enfoque basado en procesos y a la visión sistémica de la organización.," *Rev. Ciencias Estratégicas*, vol. 14, no. 15, pp. 33-42, 2006.
- [9] M. Alzate Reina, S. I. Angulo Espinosa, A. M. Segura Cardona, and A. Trujillo Zea, "Gestión de riesgos para entidades promotoras de salud - Régimen contributivo en Colombia," *Rev. CES Med.*, vol. 24, no. 1, 2010.
- [10] R. Ramírez, J. Meneses, and M. Floréz, "Una propuesta metodológica para la conducción de revisiones sistemáticas de la literatura en la investigación biomédica," *Rev. CES Mov. y Salud*, vol. 1, no. 1, pp. 61-73, 2013.
- [11] L. Gómez-Luna, Eduardo; Fernando-Navas, Diego; Aponte-Mayor, Guillermo; Betancourt-Buitrago and Andrés, "Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización," *Dyna*, vol. 81, no. 184, pp. 158-163, 2014.
- [12] M. Jenkins, "Evaluation of methodological search filters-a review," *Heal. Inf. Libr. J.*, vol. 21, no. 3, pp. 148-163, 2004.
- [13] G. Urrutia and X. Bonfill, "Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistematicas y metaanálisis," *Med. Clin. (Barc.)*, vol. 135, no. 11, pp. 507-511, 2010.
- [14] P. D. Gerstenberger, "Risk management for the endoscopy center," *Gastrointest. Endosc. Clin. N. Am.*, vol. 12, no. 2, pp. 367-384, 2002.
- [15] D. E. Riesgos, "Colaboración Especial," pp. 527-540, 2003.
- [16] R. Pardo et al., "Puesta en marcha de una unidad de gestión de riesgos clínicos hospitalaria," *Rev. Calid. Asist.*, vol. 20, no. 4, pp. 211-215, 2005.
- [17] F. de Montalvo-Jääskeläinen, J. Moreno-Alemán, and M. Santamaría-Pastor, "Incidencia de la Ley de autonomía del paciente en la gestión del riesgo sanitario. Nuevas perspectivas legales de la información y la historia," *Rev. Calid. Asist.*, vol. 20, no. 2, pp. 100-109, 2005.
- [18] M. C. Martín and J. Ruiz, "Acontecimientos adversos en Medicina Intensiva. Gestionando el riesgo," *Med. Intensiva*, vol. 30, no. 6, pp. 284-292, 2006.
- [19] J. C. McIlwain, "A review: A decade of clinical risk management and risk tools," *Clin. Manag.*, vol. 14, no. 4, pp. 189-199, 2006.
- [20] D. Krewski et al., "An integrated framework for risk management and population health," *Hum. Ecol. Risk Assess.*, vol. 13, no. 6, pp. 1288-1312, 2007.
- [21] I. Grigorov Tzenkov et al., "Sistema de gestión de incidentes críticos y eventos adversos en los ámbitos área, servicio o unidad hospitalarios. Puesta en marcha en tres fases," *Rev. Calid. Asist.*, vol. 23, no. 5, pp. 230-235, 2008.

- [22] J. Mena, A. Vírseda, A. Cañada, and M. Villamor, "Estrategia de implantación y evaluación de una unidad funcional de gestión de riesgos sanitarios en un área de atención primaria," *Rev. Calid. Asist.*, vol. 24, no. 4, pp. 135–136, 2009, doi: 10.1016/S1134-282X(09)71795-6.
- [23] N. Bianchi, G. Carta, and T. Renzetti, "Clinical risk management at the Bambino Gesù Children's Hospital," *Paediatr. Child Health (Oxford)*, vol. 19, no. SUPPL. 2, pp. S176–S181, 2009, doi: 10.1016/j.paed.2009.08.025.
- [24] D. Marcelli, M. T. Parisotto, I. Soley, L. Scatizzi, C. Boccato, and A. Stopper, "Gestione del rischio nelle organizzazioni sanitarie: l' esempio di NephroCare," *G. Ital. di Nefrol.*, vol. 6, no. 5, pp. 719–728, 2009.
- [25] I. Camaño Gutiérrez, A. García Burguillo, M. López Serrano, H. Frías Maroto, and J. M. Hernández García, "Implantación de un sistema de gestión de riesgos en obstetricia: Aprendiendo de los errores," *Progresos Obstet. y Ginecol.*, vol. 53, no. 6, pp. 223–230, 2010.
- [26] M. Briner, O. Kessler, Y. Pfeiffer, T. Wehner, and T. Manser, "Assessing hospitals' clinical risk management: Development of a monitoring instrument," *BMC Health Serv. Res.*, vol. 10, pp. 1–11, 2010.
- [27] H. Kanda, "Development of an online incident-reporting system for management of medical risks at hospital," *Yakugaku Zasshi*, vol. 131, no. 9, pp. 1353–1359, 2011.
- [28] N. Taib et al., "Early experience in a breast and ovarian cancer risk management clinic in Malaysia," *Hered. Cancer Clin. Pract.*, vol. 10, no. Suppl 2, p. A58, 2012.
- [29] M. Briner, T. Manser, and O. Kessler, "Clinical risk management in hospitals: Strategy, central coordination and dialogue as key enablers," *J. Eval. Clin. Pract.*, vol. 19, no. 2, pp. 363–369, 2013.
- [30] F. Costa, P. Santos, J. Varajão, L. T. Pereira, and V. Costa, "Proposal of an Information System to Support Risk Management – The Case of the Portuguese Hospital Center CHTMAD," *Procedia Technol.*, vol. 5, pp. 951–958, 2012.
- [31] M. Kajimoto, "Using COBIT to aid in hospital risk management," *Isaca*, vol. 1, no. January, pp. 1–5, 2012.
- [32] F. Becerril Moreno, E. Bustamante Munguira, J. A. García Verdejo, E. Bartual Lobato, M. Ros Martínez, and P. Merino De Cós, "Gestión de riesgos en un servicio de Medicina Intensiva: Conciliación de la medicación," *Farm. Hosp.*, vol. 37, no. 6, pp. 514–520, 2013.
- [33] M. Velandia, J. Hernando, and A. Pinilla, "De la salud ocupacional a la gestión de la seguridad y salud en el trabajo: más que semántica, una transformación del sistema general de riesgos laborales," *Rev. innovar J.*, vol. 23, no. 48, pp. 21–31, 2013.
- [34] J. Cohen, R. Orlando, K. Kelly, and S. Distasio, "A results-driven risk management program: one surgical group's success story," *Physician Exec.*, vol. 39, no. 1, pp. 44–49, 2013.
- [35] L. M. Reynolds, J. C. Jones, J. P. Davies, D. Freeth, and B. Heyman, "Playing the game: Service users' management of risk status in a UK medium secure forensic mental health service," *Heal. Risk Soc.*, vol. 16, no. 3, pp. 199–209, 2014.
- [36] G. Sendlhofer et al., "Systematic implementation of clinical risk management in a large university hospital: the impact of risk managers," *Wien. Klin. Wochenschr.*, vol. 127, no. 1–2, pp. 1–11, 2015.
- [37] M. Sahinoglu, E. Samelo, K. Wool, and S. Morton, "Hospital healthcare service risk assessment and management with Risk-O-Meter software metrics for a field application," *J. Integr. Des. Process Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 45–76, 2014.
- [38] T. Manser, J. Frings, G. Heuser, and F. Mc Dermott, "Deutsche Krankenhausbefragung zum klinischen Risikomanagement: Entwicklungsstand und Entwicklungspotentiale 2015," *Z. Evid. Fortbild. Qual. Gesundheitswes.*, vol. 114, pp. 28–38, 2016.
- [39] C. C. Ana and E. M. N. B. M. Juan, "Vigilancia Tecnológica para la Gestión del Riesgo," pp. 117–125, 2015.
- [40] J. Farokhzadian, N. Dehghan Nayeri, and F. Borhani, "Assessment of Clinical Risk Management System in Hospitals: An Approach for Quality Improvement," *Glob. J. Health Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 294–303, 2015.
- [41] V. Labelle and L. Rouleau, "The institutional work of hospital risk managers: democratizing and professionalizing risk management," *74th Annu. Meet. Acad. Manag. AOM 2014*, vol. 20, no. 8, pp. 375–380, 2014.
- [42] H. Nagawa, "Risk management in hospitals," *Japan Med. Assoc. J.*, vol. 49, no. 5–6, pp. 233–234, 2006.
- [43] L. E. Figueroa, "Gestión de riesgos en los laboratorios clínicos," *Acta Med. Perú.*, vol. 32, no. 4, p. 241, 2016.
- [44] O. Nielssen et al., "Procedures for risk management and a review of crisis referrals from the MindSpot Clinic, a national service for the remote assessment and treatment of anxiety and depression," *BMC Psychiatry*, vol. 15, no. 1, pp. 1–6, 2015.
- [45] L. Guo, "Implementation of a risk management plan in a hospital operating room," *Int. J. Nurs. Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 348–354, 2015.
- [46] A. Buja et al., "Adverse event reporting and patient safety at a University Hospital: Mapping, correlating and associating events for a data-based patient risk management," *Int. J. Risk Saf. Med.*, vol. 28, no. 3, pp. 163–170, 2016.
- [47] P. A. Velásquez-Restrepo, S. M. Velásquez-Restrepo, M. Velásquez-Lopera, and J. Villa-Galeano, "Implementación de la gestión de riesgo en los procesos misionales de la Sección de Dermatología de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia) siguiendo las directrices de la norma ISO 9001:2015," *Rev. Gerenc. y Polit. Salud*, vol. 16, no. 33, pp. 78–101, 2017.

- [48] F. J. Luque Mellado, F. J. Martos Molines, and Y. Lebrero Villa, "Sistema integral de gestión de incidencias en atención primaria: más allá de la seguridad del paciente," *Rev. Calid. Asist.*, vol. 32, no. 6, pp. 335–341, 2017.
- [49] V. Coronado-Vázquez, A. García-López, S. López-Sauras, and J. M. Turón Alcaine, "Implicación de las enfermeras en la gestión de riesgos y la seguridad del paciente en Atención Primaria," *Enferm. Clin.*, vol. 27, no. 4, pp. 246–250, 2017.
- [50] A. C. Cagliano, S. Grimaldi, G. Mangano, and C. Rafele, "Risk Management in Hospital Wards: The Case of Blood Procurement and Handling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 4648–4653, 2017.
- [51] R. Smith, "Clinical risk management in obstetric practice," *Obstet. Gynaecol. Reprod. Med.*, vol. 27, no. 9, pp. 277–284, 2017.
- [52] J. Jairaman, Z. Sakiman, and L. S. Li, "Sunway Medical Laboratory Quality Control Plans Based on Six Sigma, Risk Management and Uncertainty," *Clin. Lab. Med.*, vol. 37, no. 1, pp. 163–176, 2017.
- [53] L. Orlando, V. De, L. G. Tellez, and C. M. Caridad, "Gestión multicriterio de riesgos operacionales en los procesos clave de una entidad hospitalaria," *Arch. Médico Camagüey*, vol. 22, no. 2, pp. 171–182, 2018.
- [54] A. I. Fernández-Castelló, P. Valle-Pérez, M. L. Pagonessa-Damonte, M. Blazquez-Muñoz, and J. F. Tomás, "An experience in integrated management of clinical risks," *J. Healthc. Qual. Res.*, vol. 33, no. 6, pp. 311–318, 2018.
- [55] L. Vega de la Cruz, M. Pérez Pravia, and M. Moreno Pino, "Metodología con enfoque multicriterio para la gestión de riesgos tecnológicos de Ortopedia en hospitales," *MediSur*, vol. 16, no. 5, pp. 680–689, 2018.
- [56] E. Jiménez-Rodríguez, J. M. Feria-Domínguez, and A. Sebastián-Lacave, "Assessing the health-care risk: The clinical-var, a key indicator for sound management," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 4, 2018.
- [57] O. Olu et al., "What should the African health workforce know about disasters? Proposed competencies for strengthening public health disaster risk management education in Africa," *BMC Med. Educ.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [58] C. Ramírez and E. Gonzalez, "Methodological proposal for the inter-institutional management of wastes in health care centers in Uruguay," *MethodsX*, vol. 6, no. November 2018, pp. 71–81, 2019.
- [59] A. P. B. da Silva Etges, V. Grenon, J. S. de Souza, F. J. Kliemann Neto, and E. A. Felix, "ERM for Health Care Organizations: An Economic Enterprise Risk Management Innovation Program (E2RMhealth care)," *Value Heal. Reg. Issues*, vol. 17, pp. 102–108, 2018.
- [60] D. RIVERA et al., "Fortalecimiento del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en el Ámbito Psicosocial desde la Perspectiva del Marco Lógico," *Rev. Espac.*, vol. 39, no. 28, pp. 1–31, 2018.
- [61] J. D. S. Patrício, D. D. S. C. Calvo, D. P. Mendes, and G. F. de S. Moraes, "A importância do trabalho coletivo na gestão dos riscos do/no trabalho em saúde," *Rev. Sustinere*, vol. 7, no. 2, pp. 301–323, 2019.
- [62] A. P. B. da S. Etges, J. S. de Souza, F. J. Kliemann Neto, and E. A. Felix, "A proposed enterprise risk management model for health organizations," *J. Risk Res.*, vol. 22, no. 4, pp. 513–531, 2019.
- [63] E. Falomo, C. Adejumo, K. A. Carson, S. Harvey, L. Mullen, and K. Myers, "Variability in the Management Recommendations Given for High-risk Breast Lesions Detected on Image-guided Core Needle Biopsy at U.S. Academic Institutions," *Curr. Probl. Diagn. Radiol.*, vol. 48, no. 5, pp. 462–466, 2019.
- [64] D. H. Peters, O. Hanssen, J. Gutierrez, J. Abrahams, and T. Nyenswah, "Financing Common Goods for Health: Core Government Functions in Health Emergency and Disaster Risk Management," *Heal. Syst. Reform*, vol. 5, no. 4, pp. 307–321, 2019.
- [65] U. Polit, M. De, and C. Pol, "Anexo 3. formato para la entrega de informes de investigación," pp. 1–11, 2019.
- [66] C. Holland, "Risk management in gynaecology," *Obstet. Gynaecol. Reprod. Med.*, vol. 30, no. 2, pp. 35–42, 2020.
- [67] A. Theissen, K. Slim, A. Deleuze, and M. Beaussier, "Risk management in outpatient surgery," *J. Visc. Surg.*, vol. 156, pp. S41–S49, 2019.
- [68] S. Fallah-Aliabadi et al., "Risk analysis of hospitals using GIS and HAZUS: A case study of Yazd County, Iran," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 47, no. November 2019, p. 101552, 2020.
- [69] C. Torres and N. Malta, "Metodología de gestión de riesgo para procesos en una institución de salud previsual," *Universidad, Cienc. y Tecnol.*, vol. 19, pp. 91–102, 2015.
- [70] J. Santacruz-varela, F. Hernández-torres, and G. Fajardo-dolci, "Evaluación del riesgo para la seguridad del paciente en establecimientos de salud," *Cir. y Cir. Acad. Mex. Cir.*, vol. 78, no. 6, pp. 515–526, 2010.
- [71] O. Lucia and M. Sáenz, "quedar en el olvido? Introducción," 2017.
- [72] Organización Panamericana de la Salud, *Inclusión de La Gestión Del Riesgo De Desastres en Hospitales*. 2018.
- [73] M. Vázquez et al., "Experiencia en gestión del riesgo en 2 unidades de hospitalización del Hospital Monte Naranco de Oviedo Repercusión del modelo de pase de visita en la estancia hospitalaria de una unidad quirúrgica," *Calid. Asist.*, vol. 20, no. 4, pp. 235–236, 2005.
- [74] R. Roque, R. Guerra, and R. Torres, "Gestión integrada de seguridad del paciente y calidad en servicios de salud," *Rev. Habanera Ciencias Médicas*, vol. 15, pp. 317–324, 2018.
- [75] O. Consuegra Mateus, "FMEA methodology as a tool for risk management in a University hospital," *Cuad. Latinoamericanos Adm.*, vol. 11, no. 20, pp. 37–50, 2015.
- [76] G. M. Bustillo, M. J. Rojas, C. A. Sánchez, P. L. Sánchez, P. A. Montalvo, "Riesgo psicosocial en el personal de enfermería. Servicio de urgencias en hospital universitario de Cartagena," *Duazary*, vol. 12, n, pp. 32–40, 2015.

- [77] Naciones Unidas - ONU-SPIDER, "Riesgos y Desastres," Knowledge Portal.
- [78] N. P. Grigg, "Redefining quality in terms of value, risk and cost: a literature review," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, 2020.
- [79] M. Lalonde. "A New Perspective on the Health of Canadians". Information Canada. Ottawa, 1974
- [80] A. Allen, J. P. Sarmiento, and V. Sandoval, "Riesgo De Desastres en el contexto de la Pandemia," *Reder*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2020.

Aplicación de la metodología *lean manufacturing* para reducir el tiempo de producción de bolas de maní

Luis Fernando Pedraza Ruiz¹

Marlén Ordóñez Medina²

Diana Marcela Quintero³

Fundación Universitaria de Popayán
Colombia

Se realizó una investigación en la microempresa Productos Súper Ricos, dedicados a la elaboración y distribución de las bolas de maní en la ciudad de Popayán y en los pueblos de Piendamó, Timbio y el Tambo, ubicados en el departamento del Cauca, Colombia. Para el desarrollo del presente proyecto, se hizo uso de la metodología Lean Manufacturing con el fin de identificar, tratar y disminuir las mudas presentadas en el proceso de fabricación de bolas de maní, optimizando la interacción procesos, materiales, personal y maquinaria para la ejecución de las actividades necesarias para su elaboración. Inicialmente se optó por realizar una verificación del proceso mediante el levantamiento del VSM actual el cual arrojó un tiempo de ciclo total de 144.5 minutos, para luego analizar los siete principales desperdicios (mudas) mediante una lista de chequeo, encontrando que el procesamiento extra, las esperas y el transporte son las principales causas de la ineficiencia presentada en el proceso, paso seguido, mediante la técnica worksheet que consta de la hoja de tiempos, hoja de trabajo combinada y la hoja estándar de trabajo, se analizaron los puestos de elaboración de bolas de maní, con el fin de mejorar y dar solución a las mudas que generaban retrasos en la producción e insatisfacción de los clientes, finalmente se realizó el VSM mejorado, donde el tiempo de ciclo total fue de 113 minutos, logrando así, una reducción de 31.5 minutos por cada ciclo de trabajo, también se entregó una distribución nueva de los trabajadores en planta con sus actividades y tiempos respectivos, así como las recomendaciones en cuanto a manejo de equipos y mantenimiento, todo lo anterior permitió lograr una reducción de 2 horas y 10 minutos en comparación al proceso inicial y un incremento de la productividad de 1.300 bolas de maní a 2.000 bolas diarias.

¹ Ingeniero Industrial, Especialista en Gerencia de Proyectos y Magister en Diseño y Dirección de Proyectos Tecnológicos.

Contacto: luis.pedraza@docente.fup.edu.co

² Ingeniera Industrial.

Contacto: marlenordonez@hotmail.com

³ Ingeniera Industrial.

Contacto: imaqu14@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En el área de la productividad, calidad u optimización de procesos, existen diversas herramientas que pueden ayudar a una empresa a alcanzar una mayor eficiencia y eficacia en sus labores diarias y Lean Manufacturing es una de ellas, dicha filosofía trata de identificar y eliminar todas aquellas actividades que no agregan valor [1], a partir de la identificación y reducción de los desperdicios generados en la transformación de un bien o servicio.

La microempresa Productos Súper Ricos fue creada hace 19 años en la ciudad de Popayán, es una organización familiar con gran potencial conformada por 3 socios, está dedicada a la producción y comercialización de productos derivados del maní, la microempresa posee un alto nivel de rendimiento y un producto de calidad que al salir al mercado se vende rápidamente por su bajo costo. No obstante, la compañía presenta dificultades para expandirse en el mercado departamental y de esta manera generar mayores utilidades, lo anterior se genera dado que no cuenta con procesos estandarizados que garanticen un uso eficiente de los recursos técnicos, financieros y de mano de obra. Adicionalmente, no cuentan con la capacidad económica para invertir en maquinaria de alta tecnología o medios de transporte para facilitar la venta a los comercializadores interesados en su producto.

El alcance de este trabajo, abarca las etapas de: diagnóstico, mediante la aplicación del VSM, la identificación de las 7 mudas, pasando por la estandarización del proceso de fabricación de bolas de maní y finalmente una etapa de validación de resultados, todo ello basado en la filosofía Lean Manufacturing y la aplicación de herramientas de la ingeniería [2] como: diagramas de proceso, formatos para estándar de trabajo, listas de chequeo, entre otras, las cuales ofrecen las pautas para la optimización del proceso, teniendo en cuenta restricciones y actividades básicas para realizar el trabajo, especialmente cuando requieren gran precisión para que puedan ser efectivas y su paso a paso sea detallado, como en este caso del proceso de fabricación de las bolas de maní, el cual requiere un estudio de tiempos.

Como bien se conoce, el estudio de tiempos se puede aplicar tanto en grandes como en pequeñas empresas, todo ello, con el fin de analizar la situación actual respecto a los elementos (actividades, mano de obra métodos de trabajo, máquinas y medio ambiente) que intervienen el proceso, identificando las posibles causas que generan fallas y de esta manera proponer una mejor forma de realizar el trabajo [3], un estudio de tiempos, empleado de manera adecuada, puede proporcionar un medio de actuación conjunta entre las diferentes áreas de una organización, dado que permite seleccionar, planificar, diseñar y controlar apropiadamente materiales, productos, procesos, herramientas, equipos y lugares de trabajo [4].

Con el resultado obtenido de dicho estudio, la identificación de mudas y elaboración del VSM, se dio paso a la estandarización el proceso de fabricación de bolas de maní utilizando la técnica worksheet, con el fin de mejorar los cuellos de botella [5].

El presente trabajo muestra la aplicación de dicha metodología para realizar un diagnóstico en cuanto a la eficiencia de los tiempos en proceso y la propuesta de mejora utilizando la filosofía Lean como base para la resolución de los problemas encontrados en la línea de producción de bolas de maní, y así ofrecer a la microempresa una forma más fácil y eficiente de elaborar sus productos, logrando incrementar la productividad y dando un mayor alcance a sus productos.

2. MÉTODO

El presente trabajo se realizó en tres fases que dieron respuesta al desarrollo de tres objetivos específicos y el uso de herramientas de la ingeniería.

1. *Diagnosticar el proceso de fabricación de bolas de maní las para identificar las mudas.* Como primera medida, se llevó a cabo la construcción de un VSM a partir de la información obtenida del personal encargado de la empresa y del proceso productivo, para entender el trabajo realizado en la empresa. De esta manera fue posible comprender los vacíos que tenía el proceso productivo en su cadena de valor e identificación de cuellos de botella. Razón por la cual, se levantó el plano de distribución en planta y de

cargas por operario y se aplicó una lista de chequeo para identificar cuál de las siete mudas es la que más afecta el proceso de producción, y así enfocar los esfuerzos en pro de la mejora continua.

2. *Desarrollar una técnica de mejora para la disminución de los tiempos en el proceso.* Posterior a la clasificación de los desperdicios presentados en el proceso productivo, se lleva a cabo un estudio de tiempos con el fin de establecer el tiempo estándar de cada una de las etapas llevadas a cabo en la elaboración de bolas de maní y el tiempo de ciclo total. Con ello, fue posible diagramar el VSM actual e identificar los puntos críticos y elaborar la hoja de trabajo combinada y la hoja de trabajo estándar, para finalmente recomendar acciones encaminadas a la reducción de las mudas.
3. *Medir el impacto sobre la mejora propuesta.* Siendo tenidas en cuenta las recomendaciones hechas en función de la disminución de procesamientos extras, demoras y trasportes, se llevó a cabo una nueva toma de tiempos para validar el impacto en el proceso a partir de la disminución de aspectos que no generaban valor en el proceso, obteniendo como resultado el VSM futuro, una nueva distribución de actividades a los operarios y una tabla de polivalencia donde se identifican los aspectos fuertes y por mejorar de cada uno de los colaboradores de la organización.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diagnosticar el proceso de fabricación de bolas de maní las para identificar las mudas

El proceso de fabricación de la microempresa cuenta con una línea de producción, donde se elaboran productos como: bolas de maní, maní dulce, maní con pasas y maní con sal, tal como se aprecia en la Tabla 1. el proceso de elaboración de bolas de maní, es el que requiere de mayor tiempo, razón por la cual y mediante un acuerdo con los propietarios de la empresa, se decide enfocar los esfuerzos en la producción de este producto.

Tabla 1. Tiempos del proceso de fabricación por producto

Productos	Tiempos (min)
Bolas de maní	144,5
Maní dulce	60
Maní con sal	50
Maní con pasas	50

La fabricación de los productos es de tipo manual debido a esto, presenta demoras y reprocesos que afectan la producción, por tanto, se pretende mejorar el proceso de presenta una mayor demanda de tiempo para que la microempresa genere mayor rentabilidad y crecimiento, cumpliendo con objetivos propuestos.

Para elaborar el diagnóstico, inicialmente se utiliza el Value Stream Mapping (VSM) como herramienta clave dentro de la metodología Lean Manufacturing el cual permite conocer el flujo tanto de información como de materiales [6] necesarios para que un producto o servicio llegue al cliente, es resolver todos los problemas existentes en el proceso de producción para aumentar la productividad del mismo, reduciendo o eliminando desperdicios [7]. Esta herramienta permite conocer más a fondo el tiempo asociado a las actividades que se desarrollan dentro del proceso de fabricación de las bolas de maní, donde permite conocer y documentar el estado actual y futuro del mismo.

La Figura 1 hace parte del diagnóstico del proceso actual de fabricación de las bolas de maní y muestra el tiempo de ciclo de un día de trabajo de ocho horas, se levanta con el fin de identificar de forma general como está conformado el proceso y se registra para su posterior análisis y mejora. Para su elaboración se tuvo en cuenta la secuencia de las actividades con sus respectivos tiempos, los datos indicados corresponden a información suministrada por la microempresa, en esta etapa no se visualiza el valor agregado [8] porque no han iniciado procesos de investigación ni mejoramiento. La empresa cuenta con una línea de producción que consta de 4 ciclos diarios de fabricación de bolas de maní, donde cada uno va desde la recepción de materia prima hasta el empaque del producto final, con un periodo de tiempo de 138 minutos, conforme lo obtenido por el personal de la empresa.

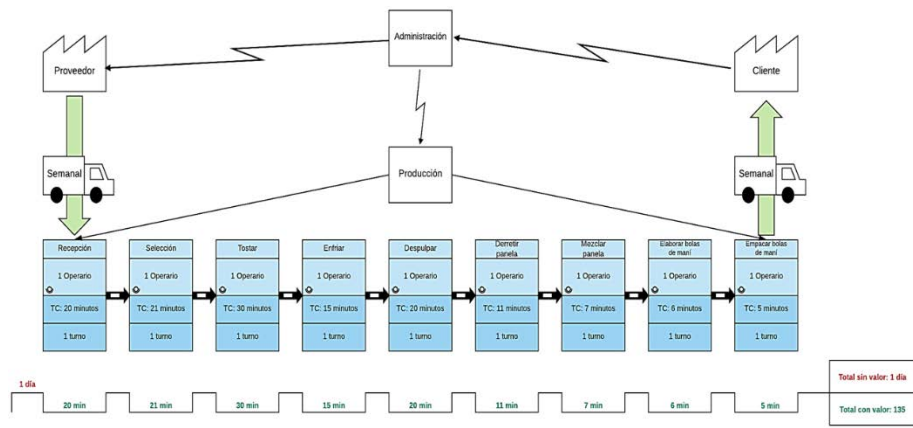


Figura 1. VSM Bolas de maní inicial - Productos Súper Ricos

Para la elaboración de los productos el proceso se cuenta con las siguientes cantidades de materia prima indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Materia prima para la fabricación de bolas de maní microempresa productos súper ricos

Descripción	Cantidad	Frecuencia	Cálculo mes
Operarios	2	Diaria	2
Maní en bulto	43 kg	Diaria	10128 kg
Bolsas plásticas	50	Diaria	1.300
Bolas de maní	1300	Diaria	33.800
Panela	8 kg	Diaria	156 kg

La microempresa cuenta con las siguientes máquinas y herramientas de fabricación:

- Despuladora: Máquina de fabricación propia, que se utiliza para extraer la cascara del maní.
- Horno: Máquina de fabricación propia para tostar el maní.
- Estufa industrial: Es un equipo de cocción, de marca Southbend en acero inoxidable de una boquilla, con una capacidad de 28.000 BTU que funciona con gas.

Dado lo anterior se pretende analizar las diferentes características propias del proceso, con el fin de identificar los problemas que están afectando la producción y que se relacionan con retrasos o desperdicios para así priorizarlos y encontrar las variables críticas a tratar, por lo tanto, se iniciara con el levantamiento de la distribución en planta [9] y el flujograma del proceso, para evidenciar cómo está establecida la microempresa.

Para conocer la secuencia de las actividades del proceso de fabricación de bolas de maní es necesario observar la Figura 2, donde se aprecia la asignación del número de actividades por operario y sus respectivos tiempos.

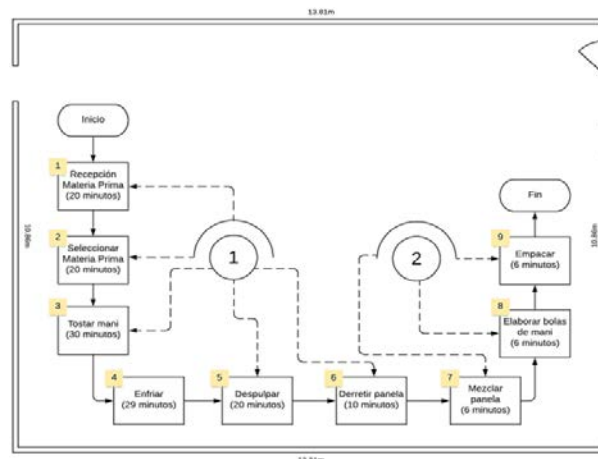


Figura 2. Distribución actual de los trabajadores en planta con sus actividades y tiempos respectivos

El proceso consta de nueve etapas, las cuales fueron numeradas según la estación de trabajo para que corresponda al orden en que se desarrollan las tareas y a la distribución actual de la planta, junto con los tiempos invertidos para cada una de las fases de producción.

3.1.1 Mudanzas o desperdicios del proceso

Con la información recolectada hasta el momento y la clara ausencia de controles que garanticen el adecuado funcionamiento del proceso productivo y con el fin de reducir los desperdicios como una manera efectiva de aumentar la rentabilidad productiva, se aplica el *check list* de identificación de mudanzas de acuerdo a los siete tipos de despilfarro por sobreproducción, inventario, defectos, re-trabajos y reparaciones, movimientos, procesamiento, transporte, esperas y cola [1, 10] indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Check list identificación de las mudanzas

	Sí	No	Importancia	Observaciones
SOBREPRODUCCIÓN				
1- Se produce para generar inventario?		x	1	La producción se hace con base a la cantidad de los pedidos diarios y un stock mínimo para nuevos clientes.
2- La producción se hace a través de grandes lotes?		x	1	La producción se realiza de acuerdo a la cantidad de pedidos diarios para preservar la calidad del producto.
3- Se planea la producción con base a un pronóstico de ventas?		x	1	La cantidad estándar son 1300 bolas diarias, excepto si hay un pedido grande.
INVENTARIO				
4-Hay inventario de materias primas?	x		1	Debe existir un stock semanal para el cumplimiento de la producción.
5-Hay inventario en proceso?	x		1	1300 unidades diarias.
6-Existe inventario de producto terminado?	x		1	Diariamente hay inventario mínimo de producto terminado.
DEFECTOS, RE-TRABAJOS Y REPARACIONES				
7-Se genera un porcentaje de productos defectuosos?		x	1	El producto terminado se realiza manualmente.
8-Existen re-trabajos?	x		2	En ocasiones.
9-Se generan reparaciones a los productos?		x	1	Al dañarse se arman nuevamente.
MOVIMIENTOS				
10-Los movimientos del operario en la estación de trabajo cumplen con los principios de economía de movimientos?		x	2	la microempresa no cuenta con una adecuada distribución en planta, los operarios hacen recorridos innecesarios.
PROCESAMIENTO EXTRA				
11-Todas las operaciones son estrictamente necesarias?	x		3	Todas son primordiales para la fabricación del producto.
12-Se pueden combinar operaciones?		x	3	Cada operación tiene una función en específico y no se rotan.
13-Se pueden hacer más rápido las operaciones?	x		3	Aplicando técnica para el mejoramiento de tiempos.
ESPERAS Y COLA				
14-El operario espera a que termine la máquina para continuar con el trabajo productivo?	x		3	El operario debería realizar otra actividad mientras la máquina termina para minimizar el tiempo.
15-hay espera en las estaciones de trabajo (falta de material, máquinas fallando o mantenimiento etc.)?	x		3	el proceso se detiene en ocasiones por fallas mecánicas de algunas máquinas, por falta de mantenimiento.
TRANSPORTE				
16-hay traslado de una estación a otra?	x		3	Se lleva el producto hasta la zona de almacenamiento (2º piso).
17-Existe manejo de medios que faciliten el transporte?		x	3	No cuenta con equipos de transporte, necesita un elevador de carga para el transporte de materia prima.

Importancia: 1 Bajo, 2 Medio, 3 Alto

Culminada la etapa de diagnóstico, fue posible analizar los aspectos que intervienen en la fabricación del producto bolas de maní, mediante la recopilación de datos y utilizando el *check list* en forma de

cuestionario, para verificar si se cumple con determinados aspectos, los cuales se califican de 1 a 3 según el nivel de importancia tal como lo muestra la Tabla 3.

Los resultados obtenidos se registran en el check list y se dejan como evidencia, donde se determinan las 3 mudas representativas en este caso se priorizaron las que están sobre 3 que es el valor de importancia más alto y afectan el proceso de fabricación del producto en cuestión y estas son: procesamiento extra, transporte, espera y cola. Lo anterior se evidencia en las Figuras 3, 4, 5 y 6. A continuación una descripción de cada una de las mudas identificadas:

- *Mudas de procesamiento extra.* El proceso de recepción y selección es de tipo manual generando retrasos en el tiempo de fabricación de las bolas de maní tal como se aprecia en las Figuras 3 y 4.



Figura 3. Selección materia prima



Figura 4. Clasificación materia prima

- *Mudas de espera y cola.* La máquina despulpadora presenta fallas mecánicas, que impiden acelerar el trabajo y también se manejan dos temperaturas, donde el operario debe estar pendiente que el maní no se pase de punto (Figura 5).



Figura 5. Máquina despulpadora

- *Mudas de transporte.* Las bolas de maní se transportan manualmente en bandejas durante todo el proceso y los empleados no tienen elementos de protección personal, como se observa en la Figura 6, generando demoras y afectaciones en las manos de los operarios.



Figura 6. Transporte manual producto en proceso

3.2 Desarrollar una técnica de mejora para la disminución de los tiempos en el proceso

Una vez realizado el diagnóstico del proceso de fabricación de bolas de maní e identificadas las mudas, y tal como se evidencia en la Tabla 3. se realiza un estudio del terreno para poder recopilar la información necesaria utilizando la técnica worksheet (hoja de trabajo) [11], en la cual se registran los tiempos obtenidos durante la inspección.

3.2.1 Hoja de tiempos

Considerado como un documento en el cual se plasman las actividades para el proceso de fabricación de las bolas de maní con sus respectivos tiempos, con el fin de hallar las fluctuaciones máximas y mínimas en cada actividad del proceso, durante un periodo determinado de tiempo se consigna la información (Tabla 4) y se toma el tiempo más bajo de cada actividad para así obtener el tiempo de ciclo total.

Tabla 4. Hoja de tiempos del proceso de fabricación de las bolas de maní

MIEMBROS DEL EQUIPO: DIANA QUINTERO, MARLEN ORDOÑEZ				FECHA Y HORA : 14 AL 18 DE NOVIEMBRE DE 2018				CAMBIO DE PROCESO: FABRICACIÓN DE LAS BOLAS DE MANÍ															
	DÍA 1				DÍA 2				DÍA 3				DÍA 4				DÍA 5				Variación	T<	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
1	22	23	34	30	20	25	20	25	27	25	20	27	20	35	25	30	30	26	21	31	35	20	20
2	20	21	22	20	22	24	25	20	23	21	20	24	21	22	22	21	24	23	26	20	26	20	20
3	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
4	32	29	34	34	37	37	40	40	36	36	33	33	40	40	37	37	45	45	37	32	45	29	29
5	26	23	28	28	20	25	23	26	20	20	23	23	22	23	20	20	23	24	25	25	28	20	20
6	14	10	12	12	11	10	12	16	12	11	12	11	12	12	14	16	13	11	12	13	16	10	10
7	7	8	7	7	6	7	8	9	6	6	6	7	7	8	8	6	6	8	6	6	9	6	6
8	6	5	6	8	6	5	6	7	6	7	5	6	5	6	6	6	7	7	7	6	8	5	5
9	5	5	5	6	6	6	5	5	5	6	4	5	6	6	5	5	5	6	5	5	6	4	4
Total Periodic work	162	154	178	174	158	169	169	177	165	162	153	166	163	181	167	171	182	179	169	167	182	153	153
																						TC	144,5
																						TT	19s

Para la toma de tiempos, se visitó a la empresa por un periodo de 5 días y se tomaron 4 ciclos diarios de tiempos por cada una de las fases de elaboración del producto, donde quedan registrados los tiempos máximos y mínimos, tiempo de ciclo (la sumatoria de tiempo en que el proceso se ejecuta) y takt time [12]. De lo anterior se evidencia que las actividades con más demoras según la información en la Tabla 4 son:

- Tostar: (30 min) Se manejan temperaturas de 180 a 200 grados (°C) y están pendientes dar vuelta al producto mientras se cumple el tiempo de cocción.
- Enfriar: (29 min) cuando se retira el producto del horno se deja en bandejas extendidas para enfriarse con un ventilador.
- Recepción: (20 min) el proceso es realizado por el operario quien debe recibir el producto en la puerta y llevarlo a la planta que queda en el segundo piso, haciendo uso de la fuerza física.
- Despulpar: (20 min) se utiliza la maquina despulpadora la cual presenta fallas en su funcionamiento por falta de mantenimiento preventivo y el operario debe estar pendiente de su marcha.
- Seleccionar: (20 min) es de tipo manual utilizando una zaranda y repasándolo 4 veces, para que el maní en mal estado sea descartado durante el proceso.

Realizando el VSM con el promedio de los tiempos por actividad representados en la Tabla 4, y de acuerdo al trabajo de campo, se procede a diagramar el VSM actual representado en la Figura 7.

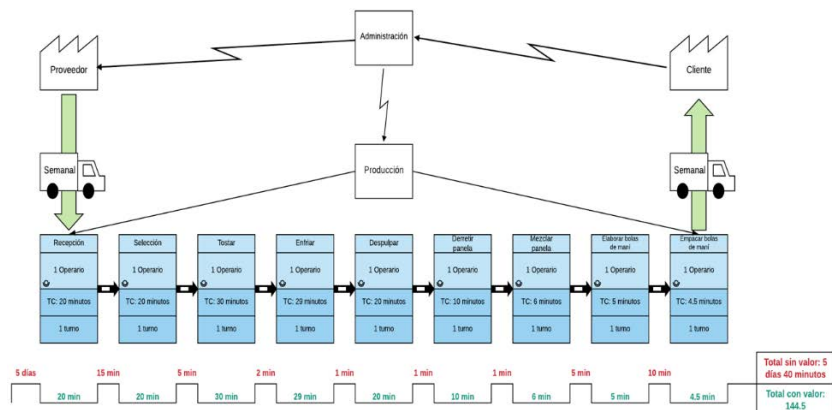


Figura 7. VSM Bolas de maní con prueba de tiempos - Productos Súper Ricos

El un nuevo VSM registra la información recopilada de las pruebas realizadas por 5 días y se observa que el proceso maneja un tiempo de recorrido (Lead time) de 5 días y 40 minutos y una suma de tiempos de ciclo total de 144 minutos y 30 segundos, tal como se puede evidenciar, los datos difieren totalmente a los valores de la Figura 1, debido a que la microempresa no tenía completa la información ni había realizado pruebas de tiempos anteriormente. Una vez identificadas las actividades con más demoras, se resume en la Tabla 5, donde se muestra el tiempo promedio de cinco días, en cuatro ciclos diarios, para la fabricación del producto.

Tabla 5. Promedio actual de tiempos de actividades del proceso de fabricación de bolas de maní

Actividad	Tiempo ciclo (en minutos)
1 Recepcionar MP	20
2 Seleccionar	20
3 Tostar	30
4 Enfriar	29
5 Despulpas	20
6 Derretir panela	10
7 Mezclar panela con maní	6
8 Hacer bolas de maní	5
9 Empacar	4,5
Total	144,5

3.2.2 Hoja de trabajo combinada

Luego de establecida y definida la toma de tiempos, se procede a graficar en la hoja combinada la secuencia de los pasos del operario en la realización de sus actividades [13], las cuales se observan en la Figura 8.

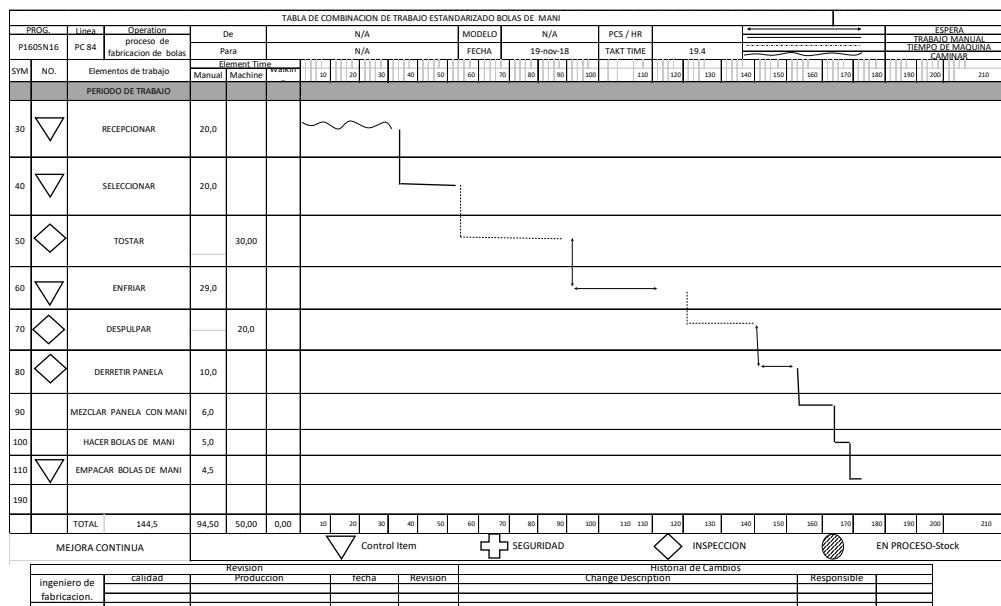


Figura 8. Tabla combinada de trabajo estandarizado fabricación de las bolas de maní

El proceso consta de tiempos de máquina de trabajo manual, dando como resultado los 144,5 minutos del proceso de elaboración de bolas de maní. A lo largo de la actividad, se cuenta con 4 etapas de control y tres de inspección de producto, de esta manera se garantiza la calidad del producto por la cual es reconocido y consumido.

3.2.3 Hoja estándar de trabajo

La hoja estándar de trabajo [14], muestra la manera correcta de realizar un trabajo, disminuyendo los tiempos de cada actividad y por ende los retrocesos generados en cada una de las etapas, en el análisis de las mudas de producción se determinó que las fallas se encuentran en la asignación de actividades a cada uno de los dos operarios, para ello ver la Figura 9.

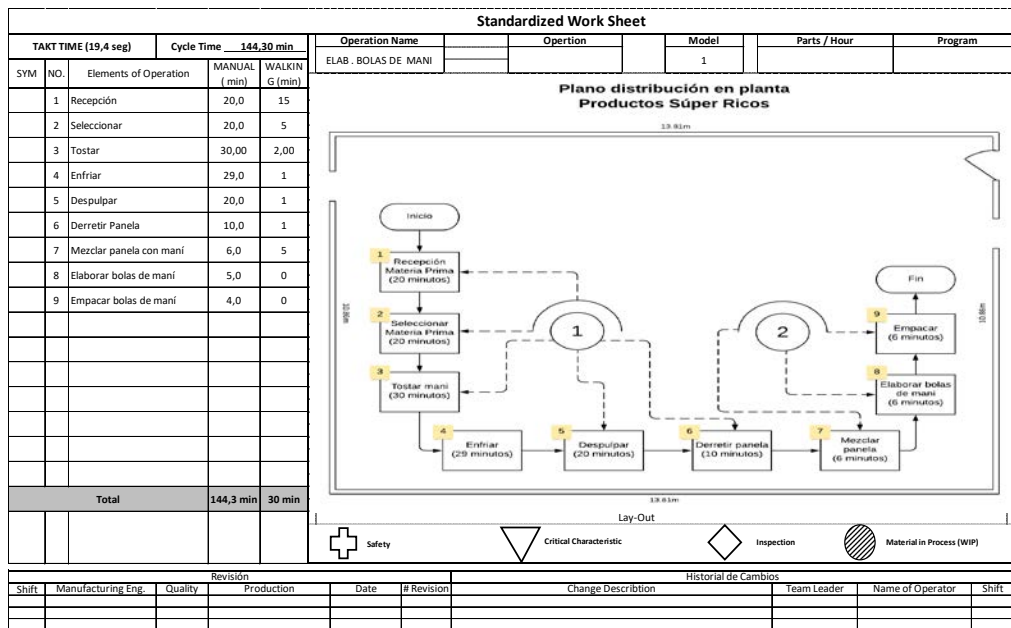


Figura 9. Hoja estándar de trabajo actual de fabricación de las bolas de maní

En la hoja de trabajo se puede observar que el proceso es realizado por dos operarios, donde el operario 1 se encarga de las actividades 1 a la 6 y el operario 2 de las actividades 6 a la 9, evidenciando la recarga de trabajo en el primer trabajador. Una vez finalizada la fase de trabajo de campo se pueden sugerir varios cambios dentro de cada una de las mudas identificadas. En el proceso el personal se debe capacitar y tener en cuenta:

- **Procesamiento:** hay un 20% de desperdicio de tiempo, teniendo en cuenta que son 144,5 minutos por cada ciclo de trabajo que, al multiplicarlos por 4 ciclos, suma 578 min correspondientes al valor total de tiempo del proceso, equivalentes a 9 horas 36 minutos de trabajo diario. Dado lo anterior si el tiempo normal son 8 horas de trabajo que corresponden al 100%, su diferencia arroja un tiempo de 1 hora y 36 minutos de desperdicio, adicional a esto falta un estándar de trabajo y no se tiene establecido el tiempo para realizar cada actividad, dando como resultado un uso excesivo del tiempo y su jornada diaria laboral.
- **Esperas y colas:** Cuando el operario está realizando el proceso de elaboración de bolas de maní, continuamente está pendiente en cada estación asignada (5 para el operario 1 y 4 para el operario 2), en la cual debe dedicar especial cuidado al tostado del maní debido a las temperaturas que se manejan (entre 180 y 200°C), porque de no ser vigilado se corre el riesgo de quemar el producto.
- **Despulpado:** la maquina presenta fallas y se detiene por momentos, generando desperdicio de tiempo dados los ajustes que se le deben de realizar, por otra parte, en el proceso de selección, el operario se desgasta porque debe escoger bien el grano de maní y estar pendiente de su clasificación entre conforme y no conforme.
- **Transporte:** en el proceso hay un tiempo de recorrido de (30 minutos), porque se transportan manualmente las arrobos de maní y demás materiales, desde la puerta de entrada a la fábrica, hasta el área de producción que se encuentra en el segundo piso.

Mediante lo anterior y posterior al análisis de cada una de las causas y efectos generados en el proceso productivo, se procede con el desarrollo de las mejoras en los cuellos de botella identificados y la medición del cambio propuesto.

3.3 Medir el impacto sobre la mejora propuesta

Después de establecer las mudas de producción de mayor relevancia y una vez registrada la información obtenida de los tiempos en proceso, se sugieren cambios a realizar en la planta, de acuerdo a la implementación de las siguientes medidas.

3.3.1 Medidas inmediatas en los procesos

- *Enfriar:* se proponen dos ideas: la primera consiste en instalar un reloj con alarma con el tiempo real requerido para el proceso de enfriado, esto con el fin de alertar al operario de que el producto ya está listo y las segunda distribuir las actividades de manera uniforme entre los dos operarios, utilizando mesas cercanas al puesto de trabajo para colocar las bandejas y así pasar el producto en proceso a la siguiente etapa.
- *Recepción:* Es importante mencionar que el área de producción está ubicada en un segundo piso, por lo tanto, los empleados deben hacer un recorrido de subir y bajar, además de cargar al hombro los materiales requeridos para la producción. Como medida inmediata se implementa un sistema de elevación manual, cuyo valor esta aproximado en \$200.000 pesos y está compuesto por láminas de acero inoxidable, poleas y un cable metálico, como se muestra en la Figura 10, este elevador transporta cargas de 65 a 200 kg aproximadamente, y permite agilizar el trabajo, evitando lesiones de columna causadas por cargas y aumenta la eficiencia en el mejoramiento de los tiempos en la ejecución de la actividad.



Figura 10. Elevador manual

- *Seleccionar:* se encontró que la operación se realiza manualmente y se genera desperdicio de tiempo de 5 minutos y en algunas ocasiones más de lo necesario, debido que los operarios no tienen un orden o un estándar que les indique el tiempo que se deben tomar para sus respectivos descansos, adicional a esto utilizan el celular sin control, aquí la microempresa debe elaborar un documento o reglamento interno y difundirlo a sus empleados y así mitigar este tipo de impases. Como medida inmediata se sugiere inspeccionar la actividad con cronometro y se implementan tiempos de descanso puntuales para disminuir la pérdida de tiempo de los operarios.
- *Despulsar:* se propone como solución inmediata arreglar la despulsadora e implementar un plan de mantenimiento preventivo periódico para minimizar las situaciones evidenciadas en la Figura 11.



Figura 11. Despulsadora

Aplicando las medidas anteriores, se realiza una prueba piloto por 5 días cronometrada (del 9 al 13 de enero de 2019) y se tienen los resultados expresados en la Tabla 6.

Tabla 6. Hoja de tiempos del proceso mejorado de fabricación de las bolas de maní

MIEMBROS DEL EQUIPO: DIANA QUINTERO, MARLEN ORDOÑEZ				FECHA Y HORA : 9 AL 14 DE ENERO DE 2019				CAMBIO DE PROCESO: FABRICACIÓN DE LAS BOLAS DE MANÍ															
	DÍA 1				DÍA 2				DÍA 3				DÍA 4				DÍA 5				Variación	T<	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
1	16	15	16	15	17	15	16	15	17	17	15	15	15	15	16	15	15	16	15	15	17	15	15
2	15	16	16	15	15	17	15	15	16	16	15	15	16	15	17	15	16	15	15	16	15	15	15
3	31	32	30	30	32	30	31	31	30	30	32	31	30	30	31	30	30	31	30	30	30	30	30

4	22	20	20	21	20	21	20	20	22	22	20	20	21	21	20	20	22	21	20	20	21	20		
5	16	15	15	16	16	15	17	15	15	16	16	15	17	15	15	17	16	15	15	16	16	15	15	
6	9	8	9	8	8	8	9	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	9	8	8	8	8		
7	4	4	4	5	4	5	5	4	4	4	5	4	4	5	5	4	4	5	4	4	5	4	4	
8	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	3	3	5	3	4	3	3	4	3	4	3	3	3	
9	4	3	4	4	3	3	5	3	5	5	3	3	3	4	4	3	3	5	4	3	3	3	3	
Total Periodic work	120	116	117	117	119	117	122	114	121	121	117	114	120	116	120	115	115	121	116	116	122	114	114	
																								TC 113
																								TT 12,6s

En la Tabla 7 y Figura 12, se aprecia como al comparar los tiempos y de acuerdo con las pruebas realizadas, se obtiene un mejoramiento del proceso en general.

Tabla 7. Comparación tiempos fabricación bolas de maní

Actividad	Tiempo sin mejora (En minutos)	Tiempo mejorado (En minutos)	Porcentaje de mejora
1 Recepcionar MP	20	15	25%
2 Seleccionar	20	15	25%
3 Tostar	30	30	0%
4 Enfriar	29	20	31%
5 Despulpar	20	15	25%
6 Derretir panela	10	8	20%
7 Mezclar panela con maní	6	4	33%
8 Hacer bolas de maní	5	3	40%
9 Empacar	4,3	3	30%
Total	144,3	113	

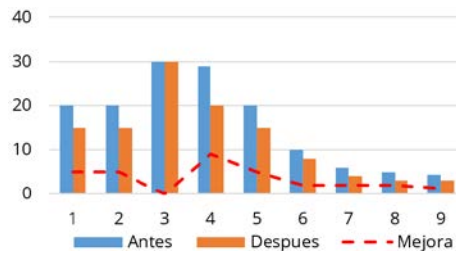


Figura 12. Comparativo de tiempos mejora del proceso

Al realizar los comparativos y de acuerdo a las pruebas realizadas con los 2 operarios, del antes y después, se observa la disminución de tiempos de 144,5 a 113 min, con takt time de 19,4 minutos (calculado con una demanda de 1600 unidades, teniendo en cuenta la variabilidad de los pedidos) en la producción, donde además de mejorar los tiempos se aumentó la fabricación de bolas de maní de 1300 a 2000 diarias, solo aplicando las medidas inmediatas descritas anteriormente.

Como última medida, se hace VSM mejorado plasmado en la Figura 13 y el Standardized Worksheet evidenciando la secuenciación de las actividades, con los 2 operarios y la nueva propuesta de distribución de cargas de trabajo indicada en la Figura 14, donde se sugiere rotar a los trabajadores cada semana para incrementar la experticia en procesos que no dominan.

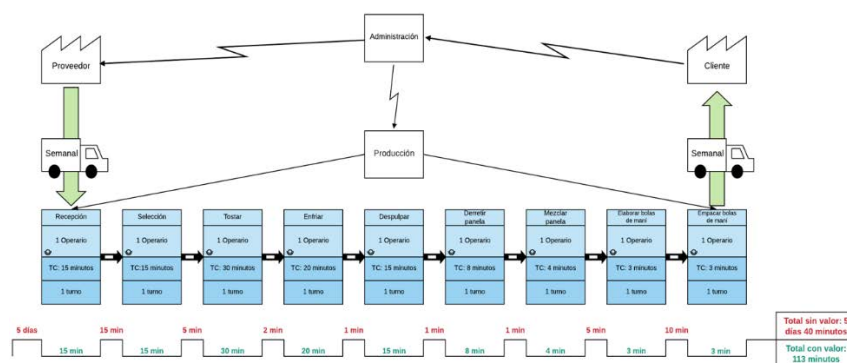


Figura 13. VSM Bolas de maní mejorado - Productos Súper Ricos

La Figura 14, muestra la Hoja de trabajo estándar mejorada de fabricación de las bolas de maní a largo plazo y la optimización de los tiempos y actividades.

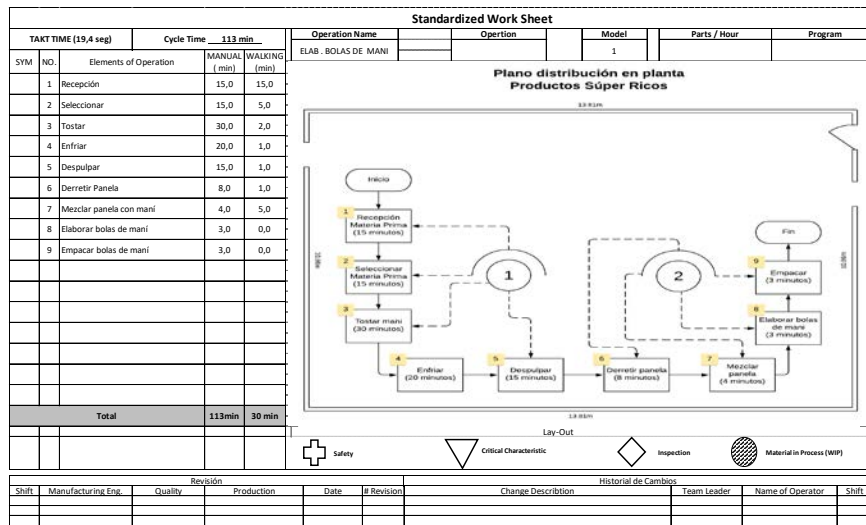


Figura 14. Hoja estándar de trabajo nueva de fabricación de las bolas de maní

En la Figura 15 es posible evidenciar la propuesta de trabajo para cada operario, el flujo del proceso y los tiempos requeridos por cada estación de trabajo.

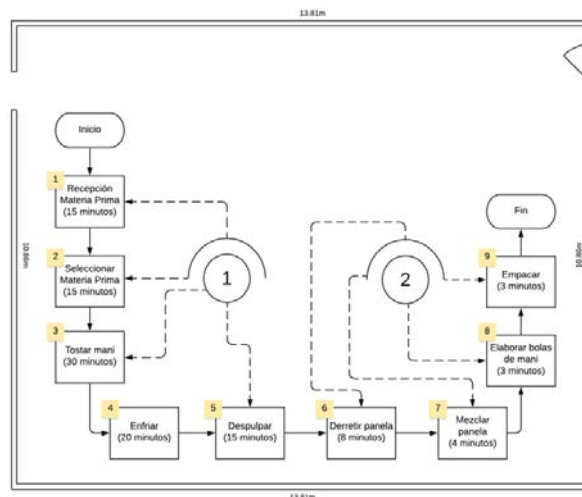


Figura 15. Distribución nueva de los trabajadores en planta con sus actividades y tiempos respectivos

La información fue socializada con los operarios y propietarios de la micro empresa para su continuidad. De acuerdo a los resultados de la prueba piloto en la nueva distribución de trabajo en planta se propone la unificación de las actividades y capacitar el personal, logrando que el proceso se realice en menor tiempo con los 2 operarios y los recursos existentes como solución a corto plazo. De esta forma los empleados se van sensibilizando a futuros cambios.

Dado lo anterior y teniendo en cuenta que hay dos operarios multifuncionales, es decir, trabajando en diferentes puestos, se elabora la matriz de polivalencia [15] que es otra de las herramientas utilizadas en Lean Manufacturing, donde se evalúa la capacidad del operario y el nivel del equipo (Tabla 8).

Tabla 8. Matriz de polivalencias a largo plazo

Nombre	Recepción	Selección	Tostar	Enfriar	Despulpar	Derretir panela	Mezclar panela y maní	Hacer bolas de maní	Empacar
Magnolia Orrego	C	C	BS	BS	BS	NC	NC	NP	NP
Jhon Palechor	BS	BS	NP	NP	NP	NP	NP	NC	NC

C Capacitado, BS Bajo supervisión, NP Necesita perfeccionamiento, NC No capacitado

Aplicada la matriz de polivalencia se observa que ninguno tiene perfeccionado el proceso, ni se ha capacitado para realizar las tareas completas que intervienen en el proceso, se recomienda capacitación a todo el personal para poder realizar rotaciones y mejorar la eficiencia del proceso. Por último, se elabora el resumen de otros desperdicios reflejando los resultados durante el año 2018, para tener en cuenta en futuros proyectos indicados en la Tabla 9.

Tabla 9. Cantidad y tipo de desperdicio año 2018

Materia prima	Cantidad
Maní en bulto	46 kg
Bolsas plásticas	100 und
Panela	16 kg

Se puede observar que se desperdiciaron 46 kg de maní considerado como el maní en mal estado, 100 bolsas plásticas, por defecto o mala manipulación, o las quemaron en el momento del sellado manual y 16 kg de panelas, al realizar mal el proceso de melcochado la panela pierde propiedades y se deshacen. Para mejorar estos indicadores se tomaron las siguientes medidas:

- Revisar el maní y verificar su estado al momento de recibirlo para evitar en mayor medida el desperdicio y si es el caso y no cumple con la calidad del producto devolverlo y pedir cambio al proveedor.
- Se realizó la compra de un sellador automático para el cierre de las bolsas.
- Estandarizar el tiempo de derretido de la panela (8 min) y mejorar el empaque en bodega para evitar que los roedores la contaminen.

4. CONCLUSIONES

Mediante el diagnóstico del proceso de fabricación de bolas de maní, bajo el enfoque de los 7 desperdicios en la microempresa productos súper ricos, se identificaron las 3 mudas más relevantes que lo afectan con un grado 3 (importancia alta): procesamiento extra, transporte y espera y cola.

El desarrollo del VSM actual y el VSM futuro, le permitió a la empresa conocer de manera clara sus procesos y los cuellos de botella y de esta manera realizar ajustes en función de la calidad y la productividad.

Mediante el trabajo realizado se disminuyeron los tiempos en los procesos de: Recepción materia prima: 25%, Seleccionar: 25%, Enfriar: 31%, Despulsar: 25%, derretir panela: 20%, Mezclar panela: 33%, hacer bolas de maní: 40% y empacar: 30%.

Se aplicaron medidas correctivas inmediatas, donde se evidenciaron resultados favorables como el aumento diario de la producción en un 35%.

Mediante la técnica worksheet, se evidencia que mediante la estandarización de tiempos y actividades se logró una disminución de 9 horas con 30 minutos a 7 horas con 20 minutos, equivalente a una reducción de 2 horas con 10 minutos, aumentando la producción de 1.300 a 2.000 bolas diarias de maní.

REFERENCIAS

- [1] *Lean Manufacturing paso a paso*. 2008. Recuperado: www.lean.org
- [2] López Lemos, P. *Herramientas para la mejora de la Calidad*, Madrid: Fundación Confemetal, 2016.
- [3] Lázaro, R. *Técnicas Utilizadas para el Estudio de Tiempos, Cultura Científica y tecnológica (CULCYT)*, 2005.
- [4] García Criollo, R. *Estudio del trabajo: Medición del trabajo*, 1998.
- [5] Cuatrecasas Arbós, L. *Gestión de la producción. Modelos Lean Management, de Organización de la producción y dirección de operaciones*, 2012.
- [6] King, P. L. y King, J. S. *Value Stream Mapping for the Process Industries*, 2015.
- [7] Socconini, L. *Lean manufacturing paso a paso*, 2019.
- [8] Galgano, A. *Las tres revoluciones: caza del desperdicio: doblar la productividad la lean production*, 2002.
- [9] Meyers, F. E. *Diseño de Instalaciones de Manufactura Y Manejo de Materiales*, 2006.

- [10] Rajadell, M. y Jose, S. *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*, 2010.
- [11] Llewellyn Cooke, M. y Murray, P. *Trabajo organizado y producción*, 1942.
- [12] Hernández, G. y Godínez, A. *El gran libro de los Procesos Esbeltos*, 2014.
- [13] Cuatrecasas, L. *Claves de Lean Management: un enfoque para la alta competitividad en un mundo globalizado*, 2006.
- [14] Caso Neira, A. *Técnicas de medición del trabajo*, 2006.
- [15] Matriz de polivalencia. 2008. Recuperado: http://evaluador.doe.upv.es/wiki/index.php/Matriz_de_Polivalencia

Propuesta para la optimización de un proceso productivo a partir de Value Stream Mapping VSM

Nidia Stella Rincón Parra¹
Sonia Patricia Garzón Martínez²
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Colombia

Este capítulo tiene como objetivo presentar una propuesta de optimización del proceso productivo de pintura electroestática a partir del Value Stream Mapping VSM, de la empresa Soldipintec en la ciudad de Duitama, Colombia, ya que es perentorio buscar estrategias para aumentar la producción; en razón a lo anterior, se busca llegar a la mejora de alguno de sus procesos, por lo cual se usó la metodología planteada por [1]; que incluye 4 fases a saber: 1) el diagnóstico actual de la empresa, 2) mapeo estado actual, 3) desarrollo del mapeo futuro, y 4) análisis del mapeo futuro vs mapeo estado actual; donde se analizó el proceso *Pintura electroestática*, que el Gerente considera una de sus fortalezas, porque es líder en la región de esta actividad productiva y le ha permitido posicionarse en el mercado, para este estudio se analizó la aplicación en el producto rejilla y perfil (palomera) para 2 buses; lo que permitió concluir, que las organizaciones pueden mejorar la optimización de sus procesos, en consecuencia, con acciones de investigación y desarrollo, que en muchas oportunidades no requieren mayores recursos económicos, sino un interés puro, donde se haga uso de mejores materiales, procesos, métodos, tiempos procedimentales y herramientas, implementando innovación incremental y no disruptiva. El mejoramiento será evaluado y controlado a partir de los indicadores establecidos para tal fin: tiempo total de producción proyectado por pieza / tiempo total de producción actual por pieza y número proyectado de piezas producidas al mes/ número actual de piezas producidas al mes.

¹ Ingeniera Industrial, Especialista en Gerencia de Proyectos y Magíster en Administración de negocios Internacionales.
Contacto: nidia.rincon@unad.edu.co

² Ingeniera Industrial, Ingeniera de Sistemas y Especialista en Alta Gerencia de Mercadotecnia.
Contacto: sonia.garzon@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El VSM es conocido como el mapeo del flujo de valor y consiste en concentrar esfuerzos para obtener la fluidez de la operación empresarial, donde se requiere que las funciones de cada departamento se integren y colaboren estratégicamente [2].

A partir de la creciente necesidad de las organizaciones en reducir su inventario, en optimizar sus tiempos de producción y de entrega, así también de mejorar el flujo de los procesos, los líderes de las organizaciones han encontrado en el VSM la respuesta a esta necesidad; el sector empresarial en Colombia, es consciente de su importancia y se puede evidenciar con los análisis que plantea [3], en el aumento significativo de la aplicación del VSM a partir del 2016; en las diferentes áreas se tienen una evolución positiva, para las ciencias computacionales con un 42,99%, Ingenierías con 14,3%, Medicina con 14,3%, entre otras.

El VSM está incluido dentro del conjunto de herramientas que utiliza el Lean Manufacturing, es de destacar que esta herramienta se fundamenta en la comprensión del flujo de valor, concepto que planteo Michael Porter desde 1985.

VSM logra representar el estado actual del sistema de producción, identificando las limitantes de la capacidad productiva, visibilizando el flujo de información y el tiempo total del ciclo, para lograr focalizar las acciones que no agregan valor al sistema.

A su vez, es fundamental comprender que el VSM, puede ser aplicado en empresas tanto de servicios como manufactureras, tal como lo plantea [4], en su análisis *Impacto del Value Stream Mapping (VSM) en diferentes compañías del sector económico y productivo* que señala que se puede lograr integrar la mejora de proceso, una administración efectiva de los mismos y obtener mejoras significativas en la forma de prestar el servicio

2. MARCO CONCEPTUAL

Para [5], el VSM es una acción instrumental que proviene del Lean Manufacturing y que se fundamenta en ver y entender todo lo que integra un proceso, para localizar sus desperdicios y poder estructurar niveles superiores en su dinámica organizacional, aminorando sustancialmente los problemas productivos.

El objeto del VSM es representar el proceso y su fluidez, desde los proveedores hasta la atención postventa, usando como eje transversal la información asertiva y con oportunidad [6]. Plantea [7] que El VSM es un instrumento acertado para lograr identificar en el proceso productivo los desperdicios y a su vez, poder identificar los puntos críticos donde se plantearán mejoras, sin embargo, al realizarse estos, VSM de forma manual pueden presentar baja precisión, pero al usarse con simuladores y tecnología apropiada resultan una herramienta eficaz.

De ahí la importancia que tiene identificar los desperdicios, ya que estos conducen a la poca competitividad, estos se encuentran inmersos en una cultura empresarial poco ágil, en la pérdida de tiempo, en sobreesfuerzos, en costos adicionales o elevados, generando detrimento de oportunidades y de capacidad operativa [8].

En [9] se plantea que la manufactura esbelta, busca identificar los tipos de desperdicios que son: sobreproducción, espera, transportes, sistemas que no mejoran las cualidades de los productos, mucho inventario, producción de piezas defectuosas, excesos en los movimientos o movimientos no planeados y cuantificados, sub o sobreutilización del talento humano. Al estar identificados los tipos de desperdicios se pueden trazar claramente en el flujo de producción y así poder establecer de forma puntual sus causas.

Las ventajas de utilizar el mapa de flujo de valor son: Articular el flujo de materiales con el flujo de la información de los procesos, fundamenta la estructura de cambios y mejoras, canaliza las acciones a metas puntuales, pero que contribuyen al mejoramiento integral de la producción o de la prestación del servicio, ayudan a controlar los sobre costos y potencia la capacidad del talento humano.

3. MÉTODO

En la presente investigación se aplicó Value Stream Mapping VSM para analizar y hacer un mejoramiento o rediseño al proceso productivo de Pintura electroestática. En la metodología a utilizar se tomó como referente las fases realizadas por [1]; para al efecto se realizó una reagrupación procedimental, que permitió desarrollar sistemáticamente y de forma precedente cada una de las acciones (Tabla 1).

Tabla 1. Fases metodológicas [1]

Fases a seguir	Acciones para ejecución de la Fase
1. Diagnostico actual empresa	<ul style="list-style-type: none">• Situación actual empresa• Selección de línea de productos• Selección del área crítica• Especificar el proceso a trabajar
2. Mapeo Estado actual	<ul style="list-style-type: none">• Identificación en el proceso actual y cuellos de botella y puntos críticos (indicador desempeño) actividad realizada/actividad asignada• Verificar documentación y datos que existen o hacen falta al proceso• Tomar tiempos de ciclo (real y disponible)• Diagramar el proceso
3. Desarrollo del Mapeo Futuro	<ul style="list-style-type: none">• Proponer mejoras según limitaciones de la organización• Identificar los cambios en los procesos• Plantear el modelo futuro de los procesos• Establecer tiempos proyectados del ciclo• Diagramar el proceso estado futuro
4. Análisis del Mapeo futuro vs Mapeo estado actual	<ul style="list-style-type: none">• Comparación de estado actual y futuro• Asignación de responsables métodos de seguimiento• Seguimiento con indicadores propuestos

Se tiene como unidad de análisis la empresa Soldipintec y el proceso a optimizar es el de Pintura Electroestática de rejilla y palomera para dos buses, donde se aplicó el instrumento de recolección de la información entrevista al gerente de la organización y al Jefe de Operaciones, igualmente se realizó observación directa no participativa en el proceso.

Tomando como Ítems de evaluación Central: Optimización, proceso, valor, tiempo, trabajo, productividad; La contextualización del análisis y planteamiento de la mejora permite partir de la pregunta orientadora: ¿Cómo aplicar pertinentemente la metodología VSM, para optimizar el proceso productivo de pintura electroestática de rejilla y palomera para la empresa Soldipintec de la ciudad de Duitama?

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Diagnóstico actual de la empresa

Soldipintec, es una empresa familiar, ubicada en la Cra. 42 14-288 Duitama, Colombia, dedicada a la industria de la metal-pintura, enfocada principalmente a dos frentes de trabajo: línea pintura, línea metalmecánica, a partir de 3 grandes procesos: servicio de pintura electrostática, fabricación de piezas soldadas y corte por plasma CNC. Tiene una antigüedad de 8 años y cuenta con 7 empleados, hace parte del clúster del sector metalmecánico, autopartista y carroceros de la ciudad de Duitama, dentro del mismo sus clientes principales son AGA y GIB, empresas donde su acción misional es el diseño y elaboración de buses de transporte intermunicipal y de fabricación de repuestos para gestión de mantenimiento y producción de mecanismos para puertas de buses; respectivamente.

A partir de la compleja situación de la pandemia se diversificó a otros sectores, como el de la construcción, donde se realiza estructura metálica de soporte; decoración externa (iluminarias de gran tamaño) e interna (murales decorativos), en sitios de descanso y turísticos a partir de diseño y corte CNC. Ha enfrentado unos mayores retos a partir de la emergencia sanitaria, debido al aumento en los precios de la materia prima hasta en un 80%, exigiendo la situación plantear estrategias como convenios con proveedores, manejando unos mayores plazos en la forma de pago, hasta de 45 días y cuando es posible trabaja de contado; seleccionando proveedores bajo criterios de lealtad, ayuda mutua, calidad y precio.

Sustenta los diseños, en la construcción colectiva del requerimiento del cliente y del aporte que sugiere la empresa, a partir de la experiencia en estos mismos procesos y de sistema informático Autocad 3D. el canal de comunicación con sus clientes es directo, no usa intermediarios, sin embargo la organización considera que debe buscar mecanismos para ganar tiempo en cuanto a la atención personalizada a partir de canales institucionales dinámicos, donde se tengan establecidas las áreas de atención de forma diferencial, con una galería de productos que incluya información efectiva, focalizada y de verdadero interés para los clientes fidelizados y potenciales; de esta forma lograr mejores tiempos de respuesta, cuando hay mayor demanda, manteniendo siempre un alto nivel de servicio al cliente.

Para el gerente de la empresa, es de vital importancia mantener el sentido de pertenencia al interior de su organización, a partir de dos acciones fundamentales: Estabilidad laboral e imagen corporativa, esta última respaldada en su marca registrada, plasmada en papelería institucional y elementos de protección personal.

- *Selección de línea de productos:* debido a su diversificación, a la política gerencial y capacidad para dar respuesta a los requerimientos de sus clientes, en la mayoría de productos pasan por sus 3 procesos misionales: corte por plasma CNC, fabricación de piezas soldadas y pintura electrostática; para el presente mapeo de valor, se va a analizar la producción de Rejilla y Perfil (palomera) de 2 buses de 40 personas, compuesto por 60 piezas irregulares aproximadamente, con un área de 30 cm² y 6 mts de largo, en aluminio.
- *Selección del área crítica:* el gerente a raíz de un principio organizacional y de su pasión por su empresa, cuando se le presentan dificultades operacionales y/o desperdicios, busca la oportunidad de mejora y la reutilización del material que así lo permite, de acuerdo al cumplimiento de calidad; en ese sentido, para la presente investigación, más que área crítica, se va a analizar el área de interés, *Pintura electrostática* que el Gerente considera una de sus fortalezas, pues le ha permitido posicionarse en el mercado. Se hace claridad que la descripción de los procesos que a continuación se presentan no se especifican de forma detallada, sino de forma genérica, para proteger el secreto industrial de la organización. Sin embargo, la información referida es lo más cercana a su procedimiento real.
- *Especificar el proceso a trabajar:* Pintura rejilla y perfil (palomera) para 2 buses: 60 piezas; el cual tiene cuatro subprocesos: 1) Preparación de la superficie (fosfato), 2) Hidrolavado, 3) Aplicación de la pintura, y 4) Secado.

1. *Fosfatado.* Se realiza para la preparación de las piezas, aplicando el fosfato de zinc, acción realizada por inmersión, logrando prevenir la corrosión. A continuación, se enuncian las actividades que se incluyen en el proceso:

- Limpieza de la superficie del metal, mediante un lavado o enjuague con agua
- Activar la superficie (mejora el propio proceso de fosfatado, no se aplica en todos los casos)
- Fosfatado
- Lavado - Desengrasado
- Lavado de neutralización (opcional)
- Secado, para eliminar cualquier residuo de agua del lavado anterior.
- Aplicación de recubrimientos complementarios: cromatado, sellado, aceitado, etc.

Con un promedio de 180 minutos para 60 piezas, aproximadamente 3 minutos por pieza.

2. *Hidrolavado.* Este proceso permite remover el fosfato sobrante en la pieza y a su vez generar mayor porosidad en la superficie de aluminio para generar mayor adherencia entre el aluminio y la pintura. Las piezas que provienen del proceso anterior son lavadas con agua a presión una por una, y se suspenden para dejarse secar a gravedad. El tiempo es de 40 minutos para las 60 piezas, aproximadamente 0,67 minutos por pieza.

3. *Aplicación de la pintura.* Se realiza en una cabina, con maquina Gema (maquina programable para aplicación de pintura en polvo), teniendo en cuenta variables como el tipo de pintura, la distancia en

la aplicación, flujo de aire, cantidad de pasadas, las cuales varían de acuerdo al tipo de producto, donde la empresa cuenta con unos intervalos de tolerancia y equipos de medición que le permiten la autorregulación y autocontrol del proceso y están en concordancia con los estándares de calidad de las empresas certificadoras para tal fin. Adicionalmente realiza pruebas de calidad por lotes, testeando el espesor de la película de la pintura verificando las micras, y pruebas no destructivas. Con un total de 120 minutos para las 60 piezas, aproximadamente 2 minutos por pieza (Tabla2).

Tabla 2. Datos Para 20 piezas

Cantidad	Dimensión	Pintura	Tiempo de Aplicación
60	30 cm ²	0,7 kg	120 minutos

4. *Secado.* Posteriormente, se trasladan las 60 piezas a un horno de curado, utilizando carros para izar las piezas, allí se funden las partículas, adhiriéndolas de forma permanente a la superficie teniendo en cuenta la longitud y onda de radiación, dando un acabado perfectamente liso. Al final del tiempo de curado en el horno, se abren las puertas y se deja enfriar a temperatura ambiente, actividad realizada al terminar la jornada laboral para evitar contaminación de otros procesos en las piezas. El tiempo es de 40 minutos a una temperatura constante de 230°C.

4.2 Mapeo Estado actual

1. *Toma de tiempo de ciclo.* A continuación, se visualiza el mapeo de valor para uno de los proyectos que realiza Soldipintec, donde se puede identificar el flujo de información al igual que el de materiales y posterior análisis para focalizar los puntos críticos y cuellos de botella. En su construcción se hizo necesario el uso de la información de las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Información obtenida estado actual

Ítem	Fosfatado	Hidrolavado	Pintura	Secado
Tiempo Ciclo	180 min/60 piezas	40 min/60 piezas	120 min/60 piezas	40min/unidad
Tiempo Montaje	12 min	10 min	12 min	12 min
Operarios	2	2	2	2
Turnos	1 - 8 horas	1 - 8 horas	1 - 8 horas	1 - 8 horas
TOcup %	42,67%	11,1%	29,33%	11,55%

Tabla 4. % ocupación por proceso - Estado actual

	% ocupación
Fosfatado	42,67%
Hidrolavado	11,10%
Pintura	29,33%
Secado	11,55%
% Total proceso	94,65%

2. *Diagramar el proceso.* Dando cumplimiento a la metodología planteada y a partir de la información obtenida de los tiempos reales, en los que actualmente se realiza el proceso; se construyó el mapeo de valor del estado actual (Figura 1). Se puede evidenciar que el tiempo que tarda 60 unidades en salir del proceso de pintura electroestática, para el proyecto de rejilla y palomera es de 426 minutos, Trabajando 2 operarios, 7.1 Horas/día, a continuación, se indica los tiempos tomados y analizados en el proceso en el estado actual, que permiten cuantificar y rectificar los *tack time* del proceso (Tabla 5).

Tabla 5. Consolidado Tack Time

Variable	Resultado	Medida
Jornada laboral	8	Horas
Descanso	0,5	Horas
Numero de turnos	1	Diario
Dias h por mes	24	Días
Demanda mensual	1440	Unidades
Tiempo disponible	7,5	Horas /día
Tiempo dis min	450	Minutos/día

Demanda diaria	60	Und/día
Tiempo tack minutos	426	min/60und
Tiempo tack minutos	7,1	Min/unid
Tiempo tack horas	7,1	Horas/60und

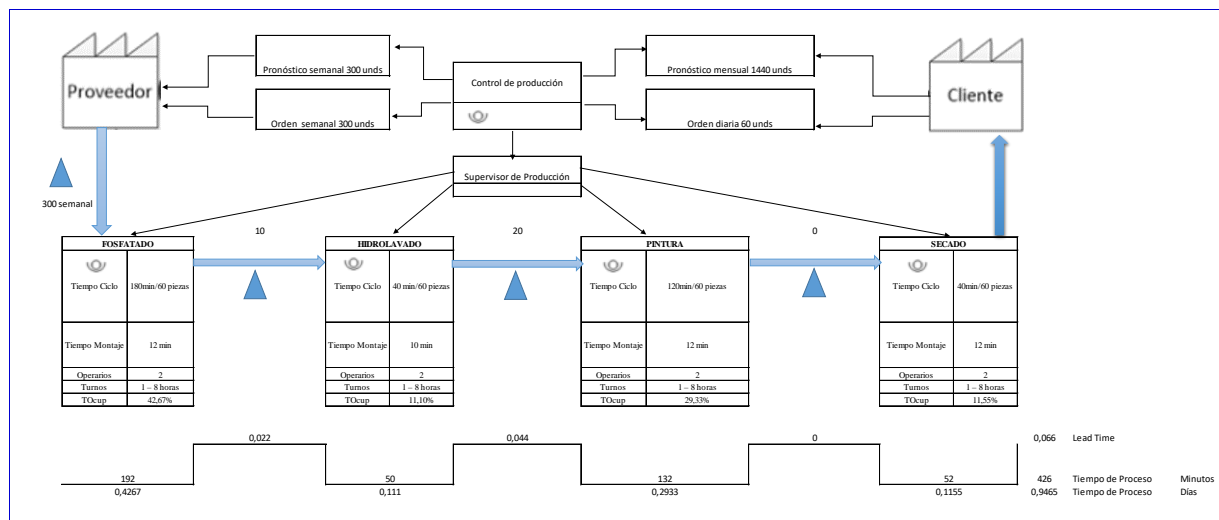


Figura 1. Diagrama proceso VSM - Estado actual

4.3 Desarrollo del mapeo futuro

1. *Proponer mejoras según limitaciones de la organización e identificar los cambios en los procesos.* Se enuncian a continuación el planteamiento de mejoras factibles, a partir del análisis *take time* y en consenso con el gerente de la organización:

- Ampliación de lugar de trabajo, para poder reorganizar la distribución en planta y mejorar flujo de material y precedencia del proceso; El gerente es consciente de la acción, se requiere un proceso paulatino del mismo por inversión del capital.
- Lograr articular de manera sistemática con los entes gubernamentales, para apoyo o convenios de las calibraciones de equipos y certificaciones de calidad y de laboratorios especializados para proceso respectivo.
- Continuar con la investigación y desarrollo tanto en los procesos como en la materia prima, aplicando innovación incremental.
- Seguir con la articulación y participación efectiva en el autoclúster del sector metalmecánico en el departamento de Boyacá, para poder generar alianzas estratégicas que permitan la acción colectiva en convocatorias gubernamentales que le ayuden a conseguir equipos y tecnología de punta.
- A nivel operativo se plantea la incorporación de una banda transportadora aérea, que permita reducir el tiempo de espera, de tal forma que mientras se secan las piezas suspendidas, estas se vayan transportando al siguiente proceso.
- Ampliar las tinajas de inmersión en concordancia con una mejor distribución en planta.
- Buscar opciones para optimizar cada uno de los procesos, a partir de la investigación de nuevos productos y de acuerdo con los estándares de calidad requeridos, y con los cuales la organización viene trabajando.

2. *Diagramar el proceso de estado futuro.* Para diagramar el proceso se plantea el estado futuro (Figura 2), estableciendo tiempos proyectados del ciclo, la cual se realizó en mesa de trabajo con los responsables del proceso y con análisis posteriores ejecutados por las investigadoras.

En el Hidrolavado no se hace modificación, porque el proceso se tiene que realizar pieza por pieza, debido a las especificaciones de diseño de cada una, ya que algunas cuentan con cavidades y hendiduras a las cuales se tiene que llegar con la presión del agua, requiriéndose que la acción sea detallada.

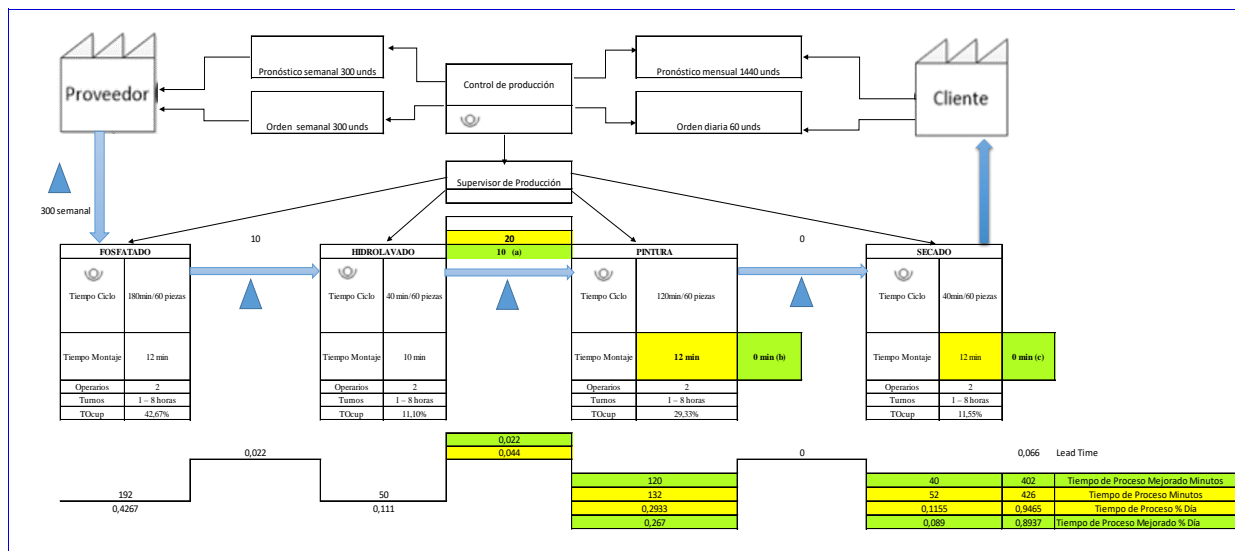


Figura 2. Diagrama proceso VSM - Estado Futuro. Celdas en amarillo representan el estado actual y las celdas en verde el estado futuro proyectado

A partir de la modificación sugerida entre hidrolavado y pintura, que es la inclusión al proceso productivo de una banda transportadora aérea, a continuación, se describe los resultados esperados en cada uno de los procesos que se proponen ser modificados, según VSM Figura 2:

- Entre hidrolavado y pintura, se tiene un tiempo muerto de 20 minutos; se propone, una reducción a 10 minutos con el montaje mencionado anteriormente, logrando que al mismo tiempo que se transporta la pieza suspendida, se esté secando, por efecto de gravedad y en condiciones ambientales.
- En el proceso de pintura y con la misma adecuación señalada, permitirá continuar con el desplazamiento de las piezas teniendo presente las condiciones para cumplir con los requerimientos de calidad, razón por la cual, la banda transportadora debe tener un diseño de empalme en forma continua. Eliminando los 12 minutos, que es el tiempo de desplazamientos y enganche de cada pieza.
- En el proceso de Secado y haciendo uso de la misma adecuación, se planea el desplazamiento continuo e ingreso de las piezas al horno, llegando a 0 minutos el alistamiento de las piezas en el horno.

4.4 Análisis del Mapeo Futuro vs Mapeo estado actual

Las acciones proyectadas al proceso completo de pintura - Perfil y palomera, buscan aumentar la eficiencia del proceso total, mejorando el tiempo de 426 minutos a 402 minutos; correspondiente a una reducción de 94,65% a 89,37% de tasa de ocupación en el día, en una producción de 60 piezas.

La cantidad de horas usadas en producción actual es de 170,4 horas al mes; es decir 7,1 horas diarias, con la proyección de mejora se utilizaría 160,8 horas al mes, es decir 6,7 horas diarias, al medirse de forma acumulada esto implica que se tendrían a favor 9,6 horas mensuales en las cuales se podría producir 86 piezas adicionales. Porcentualmente eso significa un aumento de 5,97% en capacidad de producción.

Para el seguimiento de la mejora se sugiere como responsables al gerente y jefe de operaciones, para tal fin se puede hacer uso de los indicadores de control plasmados en la Tabla 6.

5. CONCLUSIONES

En este caso concreto, con la aplicación del VSM se proyecta una mejora en la capacidad productiva del 5,97%, sustentada a partir de acciones que generan incremento en la eficiencia, estabilidad, productividad en el proceso, con estrategias de mejora factibles y en concordancia con el cumplimiento de requerimientos de calidad y trazabilidad característicos de esta organización.

Es importante mencionar que, así como Soldipintec, las organizaciones pueden mejorar la optimización de sus procesos, en consecuencia, con acciones de investigación y desarrollo, que en muchas oportunidades no requieren mayores recursos económicos, sino un interés puro, donde se haga uso de mejores materiales, herramientas, procesos, métodos y tiempos procedimentales, implementando innovación incremental.

El visualizar el sistema actual de la organización en forma holística gracias al VSM, se logra evaluar de forma sistémica pero integral la realidad de esta, permitiendo que las acciones que se planteen sean realizables, además de focalizar los cuellos de botella a partir de la identificación de los tiempos muertos.

El uso adecuado del VSM mejora el desempeño y la capacidad operativa y promulga por la reutilización de los recursos de manera que se afecte lo menos posible el entorno, siendo una opción manejar de forma combinada el VSM con estrategias corporativas que den respuesta a los actuales retos de los sistemas productivos y de la competitividad.

Tabla 6. Comparación del estado actual y futuro

Literal VSM	Descripción	Tiempo proceso actual	Tiempo proceso proyectado	Impacto de las acciones de mejora	Indicadores propuestos de seguimiento y control
a	Tiempo espera entre hidrolavado y pintura	20 minutos	10 minutos	Mejora del 50 % del Lead Time – del Tiempo espera entre hidrolavado y pintura, pasando del 4,4% al 2,2% en el día	Tiempo proyectado proceso (a)/Tiempo actual Proceso
b	Tiempo de Montaje en Pintura	12 minutos	0 minutos	Mejorando el Tiempo de Montaje en Pintura, del 29,33% al 26,7%	Tiempo proyectado proceso (b) /Tiempo actual Proceso
c	Tiempo de Montaje en Secado	12 minutos	0 minutos	Mejorando el tiempo de Montaje en Secado, del 11,55% al 8,9%	Tiempo proyectado proceso (c)/Tiempo actual Proceso
	Indicador global de producción				Numero proyectado de piezas producidas al mes/ Número actual de piezas producidas al mes
	Indicador de eficiencia por unidad				Tiempo total de producción proyectado por pieza / tiempo total de producción actual por pieza

REFERENCIAS

- [1] M. G. Cantó, A. A. Gandia, "Cómo aplicar "Value Stream Mapping"(VSM)", *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 8(2), 71-80, 2019.
- [2] E. A. Cano-Monroy, "Maximización de la inversión realizada en la adquisición de la maquinaria destinada para la fabricación de cable de silicón para el encendido de bujías y su aprovechamiento óptimo", *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores De Occidente*, 2019.
- [3] E. Peñuela Rojas, C. D. Salazar Acosta, "Revisión de la herramienta VSM (Value Stream Mapping) en el sector productivo en Colombia", *Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali*, 2019.
- [4] Y. D. Meneses Gutierrez, J. R. Suarez Luna, and F. J. Sánchez Restrepo, "Impacto del Value Stream Mapping (VSM) en diferentes compañías del sector económico y productivo", *Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali*, 2019.
- [5] I. Escaida Villalobos, P. Jara Valdéz, and M. Letzkus Palavecino, "Mejora De Procesos Productivos Mediante Lean Manufacturing", *Trilogía*, 28(39), 26-55, 2016.
- [6] M. V. de la Fuente, L. Ros, "Value Stream Mapping para el rediseño de procesos. Aplicación a un proveedor del sector del automóvil ", *In 4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management*, 1058-1067, 2010.
- [7] Y. Rodríguez-Fernández, R. Abreu-Ledón, and M. Franz, "Mapeo del Flujo de Valor para el análisis de sostenibilidad en cadenas de suministro agroalimentarias", *Ingeniería Industrial*, 40(3), 316-328, 2019.
- [8] L. Socconini, "Lean manufacturing. Paso a paso", *Marge books*, 2019.
- [9] V. González, S. M. F. Lozano, W. E. G. Sandoval, K. B. Villacreses and D. S. Vera, "Modelo del Mapeo del flujo de valor–Value Stream Mapping (VSM) para la mejora de Procesos de Producción de empresa de Dulcería-Café", *In 6th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*.

Evaluación y mitigación de los riesgos biomecánicos y de utilización de metodologías Lean para mejorar las condiciones laborales: Una revisión sistemática de la literatura

Elisa del Carmen Navarro Romero¹
Magda Viviana Monroy Silva²
Diego Fernando Sánchez Zambrano³
Luis Villarreal López⁴
Christian Ricardo Zea Forero⁵
¹⁻⁴Universidad Santo Tomás
⁵Pontificia Universidad Javeriana
Colombia

El estudio de los desórdenes músculo-esqueléticos relacionados con el trabajo, conocidos como trastornos musculoesqueléticos TME, son una de las principales causas del ausentismo laboral. Dependiendo del entorno y las condiciones laborales, se puede tipificar el impacto de estos desórdenes por lo que identificarlos es esencial para su evaluación, tratamiento y mitigación. Basados en la revisión de la literatura, se coincide en que resulta importante evaluar tres indicadores clave: intensidad, frecuencia y duración, para cuantificar el nivel de riesgo asociado al desarrollo de dichos trastornos, y generar estrategias de prevención. Las metodologías Ergo-lean han demostrado que la incorporación eficiente de la ergonomía en los procedimientos reduce los gastos asociados a incapacidades, reconocimiento de horas extras, asistencias médicas, primas o multas por incidentes, y redundan en mejoras operacionales al disminuir costos gastos. Este capítulo tiene como objetivo vislumbrar los métodos de observación utilizados para evaluar los riesgos ergonómicos en el lugar de trabajo, y cómo la implementación de principios ergonómicos simultáneamente con sistemas Lean aumentan la productividad y disminuyen los efectos negativos. Este estudio se realizó como una revisión del alcance de la literatura a través de la metodología PRISMA; se identificaron 19 métodos de evaluación del riesgo que se encuentran clasificados en función de las partes del cuerpo y los riesgos asociados, de igual manera, se encontraron los impactos, positivos y negativos, de las metodologías lean evaluadas en los distintos tipos de industrias. Existe una cantidad de herramientas para evaluar el riesgo y es importante comprender que se pueden usar diferentes métodos simultáneamente para estimar los niveles de riesgo objetivo para TME, y reconocer la importancia de incorporar elementos ergonómicos enmarcados en metodologías Lean, bajo un escenario de riesgos.

¹ Ingeniera Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial con énfasis en Gestión Organizacional. Docente investigador perteneciente al Grupo de Investigación de Procesos Organizacionales GIPO y Líder de Aseguramiento de la Calidad de la Facultad de Ingeniería Industrial.

Contacto: elisavarro@usantotomas.edu.co

² Ingeniera Industrial, Especialización en Gerencia de Salud Ocupacional y Magíster en Ingeniería Industrial. Investigadora Junior Minciencias.

Contacto: magdamonroy@usantotomas.edu.co

³ Ingeniero Industrial, Magíster en Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos, Magíster en Gestión de Marketing y estudiante de Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos.

Contacto: diegosanchezz@usantotomas.edu.co

⁴ Ingeniero Industrial, Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial y estudiante de Doctorado en Ingeniería - Ciencias de la Información y el Conocimiento.

Contacto: luis.villarreal@usantotomas.edu.co

⁵ Ingeniero Mecánico y Magíster en Ingeniería Industrial. Grupo de investigación: Centro de Estudios de Ergonomía.

Contacto: crzea@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, a nivel mundial se ha desatado gran interés en la prevención de los trastornos musculoesqueléticos TME [1] relacionados con el trabajo, debido a que se han convertido en un problema de salud pública, representado en tasas incrementales en diagnósticos de enfermedad laboral por TME, disminución de la calidad de vida de las personas afectadas, y altos costos para las organizaciones asociados con ausentismo, pérdida de productividad, atención médica, prestaciones económicas por pérdida de capacidad laboral, entre otros. Las principales causas generadoras de los TME están relacionadas con la concepción de entornos laborales que no consideran aspectos ergonómicos y que no dimensionan la exigencia biomecánica del trabajo.

La ergonomía implica la interacción entre humanos, tecnología y organización en el propósito de optimizar la salud, el bienestar y el rendimiento [2]. Deficiencias en el entorno de trabajo afecta al individuo, la empresa y la comunidad. Por lo tanto, un entorno de trabajo ergonómico bien planificado no solo implica beneficios para la salud de los individuos, sino que también conducen a una mayor calidad y ganancias de productividad para la empresa [3] y para la sociedad. Una parte específica dentro del campo de la ergonomía es, según la asociación de ergonomía IEA, la compatibilidad entre humanos anatómicos, antropométricos, características fisiológicas y biomecánicas y los parámetros estáticos y dinámicos de trabajo físico [4].

Los temas relevantes son, por tanto, posturas de trabajo, manipulación de materiales, movimientos, trabajo estático, trastornos relacionados con el trabajo y seguridad y salud [4], con el objetivo de prevenir la aparición de lesiones del sistema musculoesquelético. Estas lesiones son una de las causas más comunes de ausencia del trabajo, lo que conduce al sufrimiento individual y enorme costes para la sociedad. Las partes del cuerpo más comunes que se ven afectadas son el cuello / hombros y la espalda [5]. Las exposiciones biomecánicas en el ambiente de trabajo pueden causar [6] o agravar [7] el impacto de estas lesiones, por lo tanto, el término trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo TME se utiliza a menudo para describir estas lesiones [4].

La prevención de las enfermedades derivadas de los TME, resultan menos costosa que su rehabilitación y las medidas preventivas tienen como objetivo detectar las situaciones de trabajo ergonómicas potencialmente dañinas en una etapa temprana, antes de desorden musculoesquelético ocurra[3]. Este proceso de identificar y clasificar los niveles de riesgo para TME se llama evaluación de riesgos. El empleador debería realizar sistemáticamente una evaluación de riesgo, que se utiliza a menudo a nivel individual, pero que se deben analizar la tarea de trabajo en lugar de centrarse en la individual.

Según la OMS, los TME *abarcan más de 150 diagnósticos que afectan el sistema locomotor: músculos, huesos, articulaciones y tejidos asociados como tendones y ligamentos* [8]. Dentro de sus efectos en la salud se encuentran: dolor, limitación de la movilidad, pérdida de la destreza y las capacidades funcionales del sistema osteomuscular; los cuales limitan a la persona en su capacidad laboral y en el desempeño de actividades cotidianas; y en consecuencia, afectan la condición física, mental y social de las personas.

Los TME predominantes en la población laboral son los que afectan los miembros superiores (síndrome del túnel del carpo, epicondilitis lateral y medial, manguito rotador) y la espalda (dolor lumbar, hernias discales, pinzamientos discales) [9]. Su aparición ha sido relacionada con diversas causas en función de factores laborales y no laborales. Por su lado, los factores laborales que se han relacionado ampliamente con la sintomatología y los diagnósticos de TME, son principalmente los factores de riesgo biomecánico puesto que exigen resistencia esquelética y muscular de los trabajadores, dentro de ellos se encuentran: la manipulación manual de cargas, los esfuerzos, los movimientos repetitivos, las posturas prolongadas, mantenidas, forzadas y anti-gravitacionales.

A través del tiempo se han propuesto diversas metodologías que permiten la identificación de los factores de demanda biomecánica del trabajo, de forma individual o colectiva, y la cuantificación del riesgo de generar un TME que orienten la priorización de acciones preventivas y de intervención para el control y disminución del impacto en la salud de los trabajadores. Para la evaluación del riesgo asociado a la carga

postural se pueden destacar métodos como el OWAS, REBA, RULA, entre otros. Respecto al riesgo por la exigencia de movimientos repetitivos de los miembros superiores los métodos más conocidos son OCRA y JSI. Y en función de la manipulación manual de cargas se ha aplicado la Ecuación NIOSH. Asimismo, se han propuesto metodologías que permiten realizar una evaluación global del riesgo biomecánico. En la literatura científica se puede evidenciar que existe una diversidad de métodos que se han gestado con el propósito de analizar el trabajo en diversos contextos laborales y determinar las implicaciones de las técnicas de trabajo en el sistema osteomuscular de los trabajadores, y que han permitido a las organizaciones definir estrategias para la gestión de los riesgos biomecánicos del trabajo.

En el caso de Colombia, con el ánimo de incorporar estrategias de prevención, evaluación y mitigación de los factores de riesgo biomecánico se han acogido los referentes internacionales y se han trasladado a normas técnicas colombianas NTC de voluntario cumplimiento en el territorio nacional. Dentro de las normas vigentes se encuentra la NTC 5693, la NTC 5723, GTC 2090, NYC 5693-1, NTC 5693-2, NTC 5693-3, NTC 5723, entre otras. El reto actual, en relación con la normatividad colombiana es facilitar y garantizar su aplicación; y estar a la vanguardia de las tendencias actuales.

El presente documento corresponde a la revisión bibliográfica realizada como contextualización de un proyecto de investigación, tiene un alcance descriptivo y un enfoque cualitativo [10, 11], es de tipo básica ya que su propósito es analizar y expandir los conocimientos científicos que ya existen sobre lo estudiado, en la investigación se seleccionan palabras claves, para ser analizadas y profundizar, hasta establecer una problemática de investigación pertinente. Además, se basa en métodos de recolección de datos sin medición numérica, como las descripciones y las observaciones, identificando además métodos de evaluación y mitigación de los riesgos biomecánicos y la utilización de metodologías Lean para mejorar las condiciones laborales.

2. MÉTODO

2.1 Criterios de elegibilidad

De acuerdo con Ramírez [12], un aspecto requerido en una revisión sistemática es la especificación de los criterios de inclusión y exclusión de los estudios *los criterios de elegibilidad son una combinación de los aspectos de las preguntas clínicas además de la especificación de los tipos de diseño de estudio que han guiado estas preguntas*. Para el estudio en desarrollo se utilizó la técnica PRISMA, como una alternativa para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y meta-análisis de los datos, mediante la búsqueda, lectura y descarte de las publicaciones científicas que se aplicará en la investigación, formulando preguntas claras y enfocadas al tema, presentando a continuación su definición y descripción.

Para especificar las características del estudio, se realiza una adaptación de la metodología PICO [13], que utiliza un formato especializado para desarrollar la pregunta de investigación; es llamado así debido a que representa un acrónimo para describir sus componentes, mismos que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los componentes del sistema PICO [13]

Acrónimo y componente	Descripción de los componentes
P. Problema de interés (Population)	Población de interés o temática de interés, que destaca las características que puedan contribuir a delimitar la búsqueda de información.
I. Intervención (Intervention)	Intervención de interés (preventiva, diagnóstica o de pronóstico)
C. Comparación (Comparison)	No siempre hay este componente y se convierte en PIO. Consiste en comparar las metodologías o conceptos de estudio.
O. Resultados (Outcome)	Resultados esperados, propuestas, conclusiones y recomendaciones.

Por medio de esta herramienta, la formulación de preguntas con la estrategia PICO se buscó mejorar la especificidad y claridad conceptual de la pregunta de investigación, así como realizar búsquedas que arrojaron resultados de mayor calidad y precisión. Asimismo, favorecer la localización de información relevante, focalizando los objetivos de la búsqueda y rechazando la información innecesaria, lo cual ayudará a tomar las mejores decisiones basadas en la evidencia[14]. Para el objeto de estudio, en la Tabla 2 se detalla la estrategia PICO.

Tabla 2. Detalle de los componentes del sistema PICO, para el objeto de estudio [13]

Acrónimo y componente	Descripción de los componentes
P. Problema de interés (Population)	Conocer estudios previos relacionados con las temáticas de interés como son: Ergo-lean, ergonomic, "Biomechanical Risk", "Evaluation", aplicado en las organizaciones que hayan aportado mejoras o metodologías de gestión.
I. Intervención (Intervention)	Establecer las metodologías usadas para gestionar los riesgos biomecánicos asociados a los desórdenes músculo-esqueléticos.
C. Comparación (Comparison)	Diferentes estudios en organizaciones. La gestión de riesgo como medida de control de los procesos, y su impacto financiero.
O. Resultados (Outcome)	Analizar la evolución y aplicación de metodologías en la gestión de procesos en los últimos cinco años. (2016-2021)

2.1.1 Fuentes de información

Para la realización de este capítulo, se acudió a la utilización de bases de datos académicas, y se procedió a realizar la ecuación de búsqueda para expresar de una forma exacta los requerimientos de información del objeto de estudio; se utilizó, un lenguaje de intermediación entre la información que se quería obtener versus la información ofertada por las bases de datos. Aunque existen muchas bases de datos a disponibilidad, es importante precisar que fue necesario revisar la operatividad, funcionalidad y campo de acción de las bases de datos, para lograr afinidad de criterios con la investigación. Para lograr una adecuada revisión sistemática, se seleccionaron las siguientes bases de datos, por ser las que tienen el mayor número de artículos coincidentes con la ecuación de búsqueda, estas son: Scopus, Web of science, ScienceDirect; y solo se tuvieron en cuenta artículos científicos completos que hayan sido publicados en revistas indexadas.

2.1.2 Estrategia de búsqueda

Al plantear la estrategia de búsqueda, se presentaron varios borradores de la estrategia de búsqueda, iniciando con una base de datos, Scopus, posteriormente se fue realizando un refinamiento en los términos para garantizar mayor ajuste en los resultados. Para la construcción de la ecuación de búsqueda, se utilizaron palabras clave teniendo en cuenta el objeto de estudio y el marco de la investigación, se incluyeron nombres propios, metodologías, de igual forma se hizo el uso de palabras claves sencillas y compuestas, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados revisión bibliográfica Scopus

Ecuaciones de Búsqueda	Cant.	Ecuación tamizada	Cant.
Ergo-lean OR ergonomics AND lean	6615	ergo-lean OR ergonomics AND lean AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017))	1181
"Manual Material handling" AND Evaluation	3063	"Manual Material handling" AND evaluation AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	316
"Ergonomic Risk" AND Assessment	2438	"Ergonomic Risk" AND assessment AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	568
"Ergonomic Risk" AND Evaluation	2066	"Ergonomic Risk" AND evaluation AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	458
"Repetitive movement" AND Evaluation	1550	"Repetitive movement" AND evaluation AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	257
Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND	830	Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND musculoskeletal AND disorders AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	206

musculoskeletal AND disorders			
"Biomechanical Risk" AND Assessment	166	TITLE-ABS-KEY ("Biomechanical Risk" AND assessment) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	32
"Biomechanical Risk" AND Evaluation	69	TITLE-ABS-KEY ("Biomechanical Risk" AND "Evaluation") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))	12
"Postural Risk" AND Evaluation	30	TITLE-ABS-KEY ("Postural Risk" AND evaluation) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016))	7
"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	15	"Repetitive upper limb movement" AND evaluation AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018))	5
Ergo-lean	10	ergo-lean AND (LIMIT-TO (OA , "all"))	2

Al replicar las ecuaciones de la Tabla 4 en la base de datos Web of Science se puede evidenciar que el volumen de información encontrada es menor en comparación con Scopus.

Tabla 4. Resultados revisión bibliográfica Web os Science

Ecuaciones de búsqueda	Cantidad	Ecuación tamizada	Cantidad
"Ergonomic Risk" AND Assessment	163	("Ergonomic Risk" AND Assessment) Refined by: PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2020 OR 2019 OR 2018 OR 2017 OR 2016)	91
Ergo-lean OR ergonomics AND lean	85	(Ergo-lean OR ergonomics AND lean) Refined by: Open Access: (All Open Access) AND PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2019 OR 2020 OR 2015) Timespan: All years. Indexes: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI.	14
"Biomechanical Risk" AND Assessment	66	("Biomechanical Risk" AND Assessment) Refined by: PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2020 OR 2019 OR 2018 OR 2017 OR 2016) AND PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2019 OR 2017 OR 2016 OR 2020 OR 2018)	35
"Ergonomic Risk" AND Evaluation	65	("Ergonomic Risk" AND Evaluation) Refined by: Open Access: (OPEN ACCESS) AND PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2020 OR 2019 OR 2018 OR 2016)	35
"Manual Material handling" AND Evaluation	41	("Manual Material handling" AND Evaluation) Refined by: Open Access: (OPEN ACCESS) AND PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2020 OR 2019 OR 2017 OR 2016)	5
"Biomechanical Risk" AND Evaluation	33	("Biomechanical Risk" AND Evaluation) Refined by: Open Access: (OPEN ACCESS) AND PUBLICATION YEARS: (2021 OR 2020 OR 2019 OR 2018 OR 2017)	7
"Repetitive movement" AND Evaluation	18	("Repetitive movement" AND Evaluation) Refined by: PUBLICATION YEARS: (2020 OR 2019 OR 2016)	4
Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND musculoskeletal AND disorders	11	(Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND musculoskeletal AND disorders)	3
"Postural Risk" AND Evaluation	9	("Postural Risk" AND Evaluation) Refined by: Open Access: (OPEN ACCESS) AND PUBLICATION YEARS: (2020 OR 2019 OR 2015)	3
Ergo-lean	1	Ergo-lean	1
"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	0	"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	0

En la Figura 1 se muestra el comparativo de los resultados obtenidos de artículos relacionados con las temáticas, derivados de las ecuaciones de búsquedas previamente establecidas, es evidente que en comparación con Scopus, la base de datos Web of Science, cuenta con menor material bibliográfico de la temática en estudio, con base en ello, para contar con una mayor posibilidad de textos para revisión, y teniendo en cuenta, que las diferencias en contenido son marcadas, se procedió a revisar en una tercer base de datos, para poder concluir.

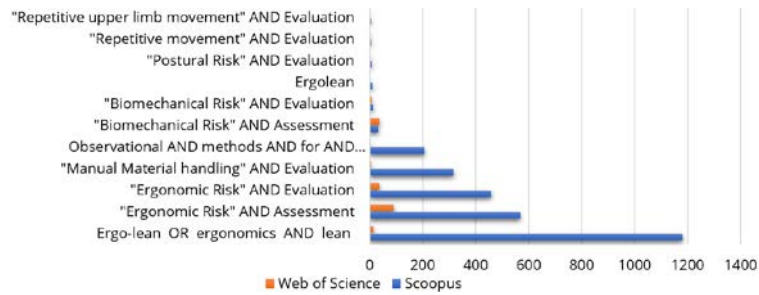


Figura 1. Comparación volumen de artículos por base de datos

Se revisa la información en una tercera base de datos, ScienceDirect, y los resultados son los que se mencionan en la Tabla 5, los criterios de exclusión utilizado corresponden al mismo para las tres bases de datos.

Tabla 5. Resultados revisión bibliográfica ScienceDirect

Ecuaciones de búsqueda	Cantidad	Ecuación tamizada
Ergo-lean OR ergonomics AND lean	2380	259
"Ergonomic Risk" AND Assessment	580	78
"Ergonomic Risk" AND Evaluation	649	79
"Manual Material handling" AND Evaluation	1349	43
Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND musculoskeletal AND disorders	987	71
"Biomechanical Risk" AND Assessment	371	16
"Biomechanical Risk" AND Evaluation	507	30
Ergolean	3	3
"Postural Risk" AND Evaluation	166	20
"Repetitive movement" AND Evaluation	1116	85
"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	5	5

De igual forma, por medio del comparativo (Tabla 6) se observa que Scopus, es la base datos, que cuenta con más información para el objeto de estudio.

Tabla 6. Comparativo base de datos y ecuación de búsqueda

Ecuaciones de búsqueda	Scopus	Web of Science	ScienceDirect
Ergo-lean OR ergonomics AND lean	1181	14	259
"Ergonomic Risk" AND Assessment	568	91	78
"Ergonomic Risk" AND Evaluation	458	35	79
"Manual Material handling" AND Evaluation	316	5	43
Observational AND methods AND for AND assessing AND ergonomic AND risks AND for AND work-related AND musculoskeletal AND disorders	206	3	71
"Biomechanical Risk" AND Assessment	32	35	16
"Biomechanical Risk" AND Evaluation	12	7	30
Ergolean	10	1	3
"Postural Risk" AND Evaluation	7	3	20
"Repetitive movement" AND Evaluation	5	4	85
"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	5	0	5

En la Figura 2, se puede observar el comparativo de artículos en las tres bases de datos utilizadas.

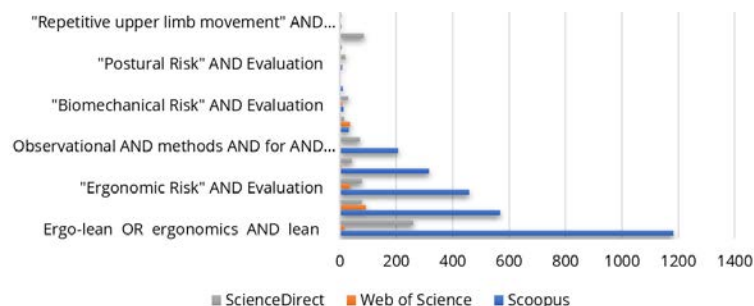


Figura 1. Comparativos artículos encontrados por base de datos

2.1.3 Criterios de exclusión

Además de las palabras clave, se utilizaron operadores para combinar las palabras y delimitar aún más la investigación. Se utilizaron símbolos reservados como comillas y paréntesis, buscando la mínima ambigüedad posible. Teniendo en cuenta que, para varias ecuaciones de búsqueda al ser una temática tan amplia, el número de artículos era extenso y para unificar los criterios, se establecieron filtros de la Tabla 7.

Tabla 7. Criterios de exclusión para tamizaje de información

Criterio de Exclusión		Criterio de Inclusión	
Acceso	All Open Access	Idiomas	All
Años de consulta	2016-2021	Países	All
Estado de Publicación	Final	Palabras Claves	All

Las limitaciones que se presentaron en el desarrollo de esta investigación fueron encontrar artículos que se enfoquen en el uso de herramientas y metodologías que incluyeran una sinergia entre Ergonomía y Lean, por ello fue necesario usar descriptores en la búsqueda para conseguir la exclusión de artículos que no se acomodaban a los criterios que se necesitan para ser considerados.

La consulta se realizó entre los meses de febrero y mayo de 2021. Se determinó, no realizar delimitación geográfica, teniendo en cuenta que durante la etapa de construcción y validación de la ecuación de búsqueda se identificó que el universo de información existente no era suficiente para algunas temáticas (ecuaciones de búsqueda) en particular, se incluyó dentro del alcance de la investigación identificar dos criterios adicionales: países en donde existen mayor cantidad de información disponible; y los años en los que se encuentra literatura, en aras de extraer conclusiones de estos dos análisis.

Del análisis de la información en la base de datos Scopus (Figura 3), que es la cuenta mayor número de artículos relacionados con el objeto de interés, se observa que para el 2019, es donde se realizó la mayor profundización entre las dos temáticas (ergonomía y Lean). Así mismo, para el mismo rango de años (2016-2021), países como Estados Unidos, Portugal y Brasil, son lo que han realizado mayores aportes. Es por ello, que en no incluyo como criterio de exclusión, país ni idioma, ya que la literatura en general encontrada, es de interés.

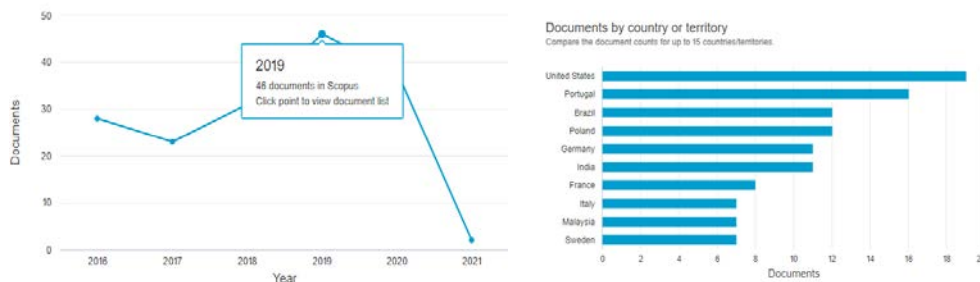


Figura 3. Análisis de Documentación Scopus

En la Figura 4 se observa que la mayoría de los documentos se encuentran relacionados con temáticas de las ingenierías, ciencias computacionales y ciencias sociales.

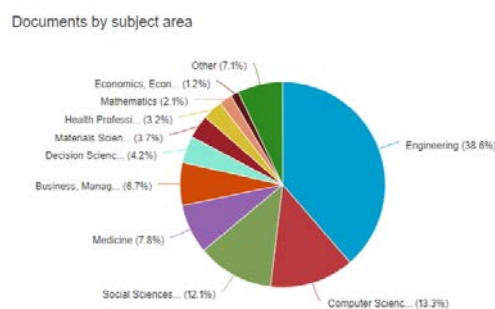


Figura 4. Número de artículos por área de estudio

Por su parte, en la Figura 5 se muestra el que 52% de los documentos corresponde a *conference paper* y un 29.8%, corresponde a artículos de investigación, razón por la cual, el tipo de documento tampoco se tuvo en cuenta como un criterio de exclusión.

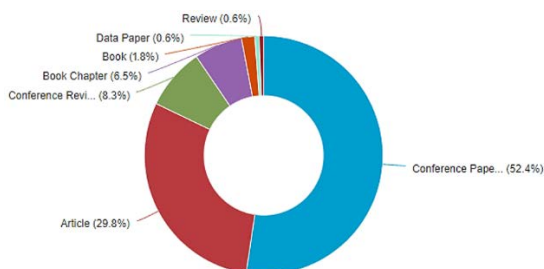


Figura 5. Tipos de documentos de investigación

Los resultados de la consulta se extrajeron mediante descarga en los formatos *BibTex* e integrado a los gestores bibliográficos Mendeley®. Las referencias encontradas, fueron depuradas, al identificar el mismo documento en diferentes fuentes de información (bases de datos), procediendo a eliminar los elementos duplicados. Así mismo, se utiliza Excel® y para organización de la información de síntesis de los resultados, clasificación y para la construcción de figuras que apoyen los resultados y discusión de la investigación.

Para realizar el tamizaje de la información, se trabajó con la declaración Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (Prisma) [11], la cual aporta un diagrama de flujo en el que se puede visualizar el desarrollo de la investigación, mejorando su calidad. A continuación, se establece el flujo de tamizaje de la información referente de acuerdo con el enfoque PRISMA (Figura 6).

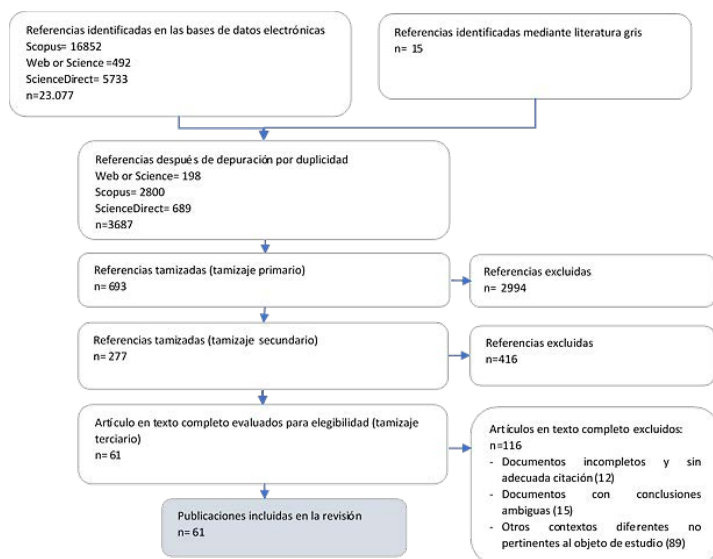


Figura 6. Adaptación del enfoque Prisma para revisiones sistemáticas

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Evaluación de los riesgos biomecánicos en el trabajo

En una evaluación de riesgos de un lugar de trabajo [15], es importante estructurar las exposiciones en diferentes componentes basados en los mecanismos fisiopatológicos para los TME [16]. En el mejor de los escenarios, una evaluación de riesgos debería cubrir todos los aspectos, pero a menudo se centran en dos o tres riesgos importantes para encontrar intervenciones adecuadas. En un entorno multifactorial, se podría utilizar un método de evaluación específico que sea construido para evaluar un riesgo específico en una tarea de trabajo durante un período corto de tiempo, o utilizar un método de evaluación de riesgos general que evalúe la carga total durante un período de tiempo más largo, es entonces, donde surge la pregunta es: ¿qué enfoque debería utilizarse? o ¿cuál es la metodología más adecuada? Al evaluar los riesgos biomecánicos, debe tenerse en cuenta tres indicadores clave de exposición:

1. (I) la "intensidad" de la carga de trabajo; por ejemplo, postura incómoda de tronco y/o extremidades (postura).
2. (F) la "frecuencia" de la carga de trabajo; ej. movimientos repetitivos.
3. (D) la "duración" de la carga de trabajo; por ejemplo, trabajo estático, falta de cambios de postura.

En la Tabla 8, usando estas categorías, muchos de los riesgos biomecánicos comunes pueden identificarse, como, por ejemplo, manipulación manual (I), postura incómoda o inadecuada (I / D), trabajo repetitivo (F) y estática se puede observar el trabajo (D).

Tabla 8. Indicadores para evaluación de los riesgos [17]

Indicadores	Riesgo	Unidad de medida	Trastorno común (TME)
I (Intensidad)	Manejo manual Postura inadecuada	Kg o newton grados	Lesiones en vertebras y discos Lesiones en tendones Lesiones en músculos
F (Frecuencia)	Trabajo repetitivo Manejo manual	Tiempo de ciclo	Lesiones en tendones Lesiones en músculos
D (Duración)	Trabajo estático Postura inadecuada	Cantidad de tiempo en una posición Número de descansos grados	Lesiones en tendones Lesiones en músculos

Las investigaciones anteriores muestran que la combinación de factores de riesgo es una premisa importante para considerar la evaluación del mismo [7]. Además, existe la necesidad de observar los factores de riesgo concurrentes para los TME.

El propósito de realizar una evaluación de riesgos biomecánicos, es decir, conocer su intensidad, frecuencia y duración, es eliminar los efectos para la salud relacionados con el trabajo, de igual identificar los factores existentes o potenciales que pueden conducir a los TME. Cuando se identifican los factores de riesgo, se deben realizar intervenciones para reducirlos o minimizarlos, de igual forma, evaluarlos puede ser útil para mejorar las condiciones del lugar de trabajo.

Es de suma importancia que la evaluación de riesgos sea bien integrada en la organización y los empleados deben estar incluidos desde el principio. Este llamado enfoque participativo, es decir, donde los empleados participan activamente en la evaluación de riesgos y en el desarrollo de la intervención, ha sido exitoso [18]. De acuerdo con G. Wilhelmus [17], hay cuatro pasos involucrados en un análisis de riesgos biomecánicos:

1. Se debe caracterizar el trabajo físico de todas las tareas realizadas, es decir, desde una perspectiva global y no particular. Hay varios métodos para esto, pero el análisis de tareas jerárquicas (HTA) [19] es un método recomendado para este procedimiento de caracterización.
2. El siguiente paso es clasificar las tareas. Esto puede basarse, por ejemplo, en el tiempo dedicado en una tarea de trabajo específica, o la gravedad de los problemas ergonómicos.
3. Realizar una evaluación objetiva de los tres indicadores clave (intensidad, frecuencia y duración) para cada tarea de trabajo y decidir la gravedad del riesgo.
4. Administrar del riesgo.

3.2 Métodos para evaluar los riesgos biomecánicos

Para la evaluación del riesgo, los métodos disponibles para la observación de riesgos se pueden dividir en tres categorías: cuestionarios, métodos de observación y métodos técnicos de medición:

1. *Cuestionarios:* el empleado evalúa los riesgos biomecánicos de la organización utilizando un cuestionario con respuestas predefinidas. Este método es fácil de usar con grandes grupos de trabajadores y permite comparaciones en el tiempo y entre grupos. Sin embargo, en los trabajadores con TME, podrían presentar algún tipo de sesgo al tener una mayor percepción en términos de intensidad, frecuencia y duración en comparación con aquellos sin TME.
2. *Métodos de observación:* estos métodos deben basarse en conceptos de un observador experto, que diligencia una hoja de puntuación predefinida mientras observa al trabajador realizar su actividad.

Actualmente, existen muchos métodos de observación diferentes para la evaluación de riesgos biomecánicos y no existe consenso sobre cómo elegir entre ellos.

3. *Métodos técnicos*: Son métodos para observar posturas, movimientos y cargas. Existen muchos recientes como son aplicaciones en smartphones [20], que pueden medir ángulos a lo largo del tiempo [15], algunos tipos de acelerómetros [21] e inclinómetros [22] ropa inteligente [21], etc. que podría utilizarse para la evaluación de riesgos biomecánicos. Estos instrumentos suelen ser muy precisos, pero son más costosos que los métodos de observación.

Una vez contextualizado el riesgo, al revisar la bibliografía se encontraron 19 métodos que cumplieron con los criterios de inclusión. En general, los métodos seleccionados han resultado de fácil uso y que aportan información útil para administrar el riesgo. Seis métodos evalúan los riesgos en todas las partes del cuerpo simultáneamente, mientras que los otros 13 métodos estudian partes específicas.

En la Tabla 9, se muestra una descripción general de las partes del cuerpo y los indicadores (I, F, D) que son evaluados por los instrumentos. Todos los instrumentos evalúan la postura(intensidad), pero no todos los métodos, evalúan la exposición biomecánica (frecuencia y duración). Solo seis de los instrumentos, tienen en consideración a los tres indicadores, que son: SI, HARM, KIM I-II, KIM III, RAMP Y WERA, y solo WERA mide el riesgo de trastornos biomecánicos para todas las partes del cuerpo.

Tabla 9. Métodos de observación para la evaluación del riesgo biomecánico TME

Método	Parte del Cuerpo	Intensidad		Frecuencia	Duración
ALLA [23]	Miembros superiores	Si	Postura	No	Si
ART [24]	Mano/dedos	Parcial	Postura	SI	Parcial
CTD [25]	Extremidades superiores	Si	Fuerza -Postura	Si	No
HAL [26]	Muñecas y manos	Si	Fuerza	Si	No
HARM [27]	Cuello/ hombro, antebrazo /muñeca	Si	Fuerza -Postura	Si	Si
KC [28]	Mano antebrazo	Si	Fuerza -Postura	Parcial	No
KIM I-II [29]	Tronco	Si	Fuerza -Postura	SI	Si
KIM III [30]	Brazo/ muñeca	Si	Fuerza -Postura	SI	Si
LUBA [31]	Cuello, hombros, parte superior de la espalda, espalda baja, codos muñecas / mano	Si	Postura	No	No
OCRA [32]	Extremidades superiores	Si	Fuerza -Postura	SI	No
OWAS [33]	Cuerpo Completo	Si	Postura	Si	No
PATH [34]	Cuerpo Completo	Si	Fuerza -Postura	Si	No
PLIBEL [35]	Cuerpo Completo	Si	Fuerza -Postura	Si	No
QEC [36]	Espalda, cuello, brazo, mano	Si	Postura	No	Parcial
RAMP [37]	Espalda/extremidades superiores	Si	Fuerza -Postura	Si	Si
REBA [38]	Cuerpo Completo	Si	Postura	No	No
RULA [39]	Extremidades superiores/ cuerpo completo	Si	Postura	No	No
SI [40]	Mano/antebrazo	Si	Postura	Si	Si
WERA [41]	Cuerpo Completo	Si	Fuerza -Postura	Si	Si

3.3 Aportes de la metodología Ergo- Lean

En las empresas se ha demostrado que la incorporación eficiente de la ergonomía en los procedimientos, políticas e instalaciones reduce los gastos asociados con la discapacidad, las horas adicionales o extraordinarias, atención médica, sanciones o multas por incidentes, e incluso interviene en la curva de aprendizaje de los empleados, al no lograr una continuidad en el desarrollo de sus actividades [42]. Por medio de la revisión bibliográfica, se tuvo como objetivo conocer el efecto de implementar herramientas de manufactura esbelta (lean) desde el punto de vista de la ergonomía en los sectores de manufactura. La implementación de metodología lean, desde la etapa de planificación del lugar de trabajo puede traer ventajas a la seguridad de los empleados y al mismo tiempo incrementar la eficiencia de los procesos [43].

Muchas de las investigaciones revisadas, hacen referencia a la calidad de vida de los trabajadores en un entorno lean, mostrando que la implementación Lean tenía impactos positivos y negativos en la calidad de vida de los trabajadores en una organización [43, 44].

Más del 50% de los estudios Lean dieron resultados negativos, mientras que el 35% de los estudios obtuvieron resultados mixtos (positivos y negativos) sobre la calidad de vida de los trabajadores [45]. Los efectos negativos en la calidad de vida de los trabajadores causan bajo desempeño, lo que llevó a una disminución general en el desempeño operativo de un sistema [46]. La calidad de vida y el desempeño operativo de los trabajadores pueden mejorarse mediante intervenciones ergonómicas [43, 47].

Varias empresas han fracasado en la implementación lean, solo un 10% de las empresas tuvieron éxito en la implementación adecuada de prácticas lean y filosofías de mejora continua [48]. Sin embargo, las plantas lean exitosas utilizan ampliamente las herramientas blandas lean, es decir, las prácticas relacionadas con los factores humanos, como la participación de los trabajadores y los clientes, los programas de desarrollo de habilidades múltiples y la resolución de problemas, así como herramientas técnicas y analíticas lean [49]. Además, la evidencia sugiere que los factores humanos y la ergonomía FHE es un parámetro crucial para lograr la mejora continua y la sostenibilidad [43]. La mayoría de los procesos lean se centraron únicamente en herramientas y técnicas lean (aspectos técnicos de lean), descuidando FHE (aspectos sociales de lean) al implementar lean en las organizaciones.

Varios estudios sobre implementación lean se centraron en prácticas lean duras (técnicas), que descuidan las blandas FHE, en la siguiente tabla se detalla algunas de los efectos en las personas ocasionados, por métricas de la metodología lean, en el factor humano, como se expone en la Tabla 10.

Tabla 10. Algunos de los resultados de la literatura sobre implementos lean y ergonomía en varios sectores

Autor	Metodología	Tipo de industria	Métricas de factor humano FH	Efectos Negativos	Efecto Positivo
[50] [51]	Estudio transversal	Manufacturera	Exigencias laborales, autonomía laboral y clima social	Efectos tanto positivos como negativos (+ y -) sobre las demandas laborales, la autonomía y el clima social.	La ergonomía puede funcionar como una técnica de fabricación ajustada, ya que se puede utilizar para definir el peligro, así como para disminuir los factores de riesgo relacionados con el peligro.
[52] [53]	Estudio transversal	Industria electrónica y metalúrgica	Estrés laboral	Efectos tanto positivos como negativos (+ y -) sobre el estrés laboral.	Aumentos de la productividad mejoró en aproximadamente un 7%, en la región de empaque en un 140%, en la región de mejora en un 40% y en la región de pulido y lijado en un 50%.
[54]	Estudio transversal	Empresas de servicios	Utilización de habilidades de los trabajadores, tensión laboral, variedad de tareas, claridad laboral, autonomía laboral, conflicto de roles y carga de trabajo.	Efectos negativos (-): mayor tensión laboral, mayor conflicto de roles, mayor carga de trabajo, poca claridad de roles, menor utilización de habilidades y variedad de tareas y menor autonomía laboral.	Mejorar en los tiempos de respuesta, en el compromiso de los empleados, aumento en la satisfacción del cliente.
[55] [56]	Estudio de campo cuasi-experimental	Automovilística	Tensión psicológica, actividades de toma de decisiones, utilización de habilidades y autonomía laboral.	Efectos negativos (-): aumento de la depresión laboral, disminución de las actividades de toma de decisiones, utilización de habilidades y autonomía laboral. Reducción de la amplitud de roles, autoeficacia y compromiso organizacional.	Los hallazgos mostraron una disminución en las ausencias de los trabajadores, ya que están interesados en trabajar en mejores circunstancias laborales y aumentar sus ingresos. A menudo hacen todo lo posible para lograr la producción requerida con la mejor calidad y cantidad.
[43] [57]	Análisis de encuestas	Manufacturera (textil)	Satisfacción laboral, estrés laboral, postura de trabajo incómoda y tensión laboral.	Efectos negativos (-): aumento del estrés laboral, tensión laboral y mala postura laboral incómoda.	La adaptación de la estrategia Ergo-Lean disminuye los impactos adversos del Lean en la calidad de vida de los empleados y mejora la eficiencia operativa, como el desempeño de los trabajadores, el

					rendimiento del desempeño, el tiempo de entrega completo, la relación de valor agregado, el desperdicio y errores.
[58] [59]	Estudio empírico	Varios	Satisfacción laboral, estabilidad laboral y salud en el trabajo	Efectos negativos (-): empeoramiento de la salud y las actitudes de los empleados en el trabajo (insatisfacción laboral, deseo de dejar el empleador).	La ergonomía puede funcionar como una técnica de fabricación ajustada, ya que se puede utilizar para definir el peligro, así como para disminuir los factores de riesgo relacionados con el peligro.

3.4 Implementación de herramientas Lean para mitigar los riesgos biomecánicos

Muchas industrias no comprenden es el potencial para aumentar la productividad mediante la integración e implementación de principios ergonómicos simultáneamente con sistemas lean [60]. La adaptación de la estrategia Ergo-Lean reduce los impactos adversos del Lean en la calidad de vida de los empleados y mejora la eficiencia operativa, como el rendimiento operacional, tiempos de entrega, la relación de valor agregado, desperdicios y errores [56].

Los hallazgos de la integración de la ergonomía con Lean indican una disminución del absentismo debido a cambios producidos y aplicados en oficinas o estaciones de trabajo, es tener mejores circunstancias laborales y así aumentar los ingresos del personal para realizar actividades y mejorar la calidad de los productos o servicios [24, 61]. Los resultados de la aplicación de la metodología Ergo-lean han mostrado una disminución en el ausentismo de los empleados, ya que están interesados en trabajar en mejores circunstancias y aumentar sus ingresos.

El método de diseño de la estación de trabajo juega un papel importante en la mejora del desempeño organizacional y los indicadores de calidad. Sin embargo, no es frecuente el diseño orientado al usuario y las demandas de tareas en las estaciones de trabajo industriales [43, 62]. Al diseñar una estación de trabajo, se deben considerar las circunstancias ergonómicas para lograr mejoras y eficiencias productivas. Los elementos ergonómicos en las empresas pueden ser difíciles de aplicar porque algunos tomadores de decisiones no ven la ergonomía como una inversión, sino más bien como un costo.

La ergonomía ajustada puede reducir el tiempo de entrega al eliminar el desperdicio de movimientos de manipulación de materiales manuales, posturas incómodas, así como aumentar la efectividad, la seguridad y salud de los trabajadores.

4. CONCLUSIONES

- La revisión actual descubrió varios estudios sobre Ergo- Lean que muestran impactos positivos y negativos en la salud de los empleados, por medio de la evaluación de riesgos posturales que a su vez eliminan los efectos en la salud relacionados con el trabajo.
- Las evaluaciones de riesgo biomecánicos también pueden ser útiles para evaluar el lugar de trabajo y favorecer las condiciones del lugar de trabajo. La evaluación de estos riesgos, involucra casi todas las actividades laborales, con menor o mayor impacto de acuerdo con la naturaleza de la tarea desempeñada.
- Estos efectos negativos asociados a la aplicación de las metodologías Ergo-lean, podrían deberse a que los instrumentos Lean se mal interpreten y utilicen de forma incorrecta.
- La mayoría de los autores de la investigación analizada estuvieron de acuerdo en que la integración de la ergonomía durante la planeación y ejecución lean podría generar ganancias, aumentos en la productividad y mejorar las condiciones laborales al mismo tiempo.
- Recientemente han surgido varios instrumentos para evaluar y guiar la ejecución Lean teniendo en cuenta los elementos ergonómicos, asociados a herramientas blandas lean que involucran el factor humano.

- La creciente implementación de lean en el lugar de trabajo ha permitido a los investigadores explorar cómo esta estrategia interactúa con otros trabajos, y como es aplicable a los diferentes tipos de empresas.
- Diseñar puestos de trabajo respetando los valores de Lean y la ergonomía, es una estrategia de las empresas para generar bienestar en los empleados y ganancias para las compañías.
- Esta revisión bibliográfica pretende ayudar a la comunidad académica y los profesionales prestan más atención a la conexión entre las metodologías lean y la ergonomía.
- La ergonomía es una ciencia clave a estudiar junto con los esfuerzos Lean, para futuros estudios, se sugiere detallar en específico las herramientas desde el Lean, que más impacto tienen sobre los riesgos ergonómicos, que desencadenen desórdenes músculo-esqueléticos.

REFERENCIAS

- [1] G. C. Castro-Castro, L. C. Ardila-Pereira, Y. S. Orozco-Muñoz, E. E. Sepulveda-Lazaro, and C. E. Molina-Castro, "Factores de riesgo asociados a desordenes musculo esqueléticos en una empresa de fabricación de refrigeradores," *Rev. Salud Publica*, vol. 20, no. 2, pp. 182–188, 2018.
- [2] B. Cirjaliu, A. Mocan, M.-E. Boatca, and A. Drăghici, "A propose approach for continuous improvement using ergonomics and quality management knowledge and methodologies," *Qual. - Access to Success*, vol. 20, pp. 135–140, 2019.
- [3] J. Verbeek, M. Pulliainen, and E. Kankaanpää, "A systematic review of occupational safety and health business cases," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 35, no. 6, pp. 403–412, 2009, doi: 10.5271/sjweh.1355.
- [4] Taylor & Francis, "IAE. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors," ed. Boca Rat., 2006.
- [5] G. H. Marchand *et al.*, "Sickness absence and concurrent low back and neck-shoulder pain: Results from the MUSIC-Norrålje study," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 16, no. 2, pp. 315–323, 2016.
- [6] W. J. A. Grooten, C. Wiktorin, L. Norrman, M. Josephson, E. W. Tornqvist, and L. Alfredsson, "Seeking Care for Neck/Shoulder Pain: A Prospective Study of Work-Related Risk Factors in a Healthy Population," *J. Occup. Environ. Med.*, vol. 46, no. 2, pp. 138–146, 2004.
- [7] W. J. A. Grooten, M. Mulder, M. Josephson, L. Alfredsson, and C. Wiktorin, "The influence of work-related exposures on the prognosis of neck/shoulder pain," *Eur. Spine J.*, vol. 16, no. 12, pp. 2083–2091, 2007.
- [8] OMS, "Trastornos musculo-esqueléticos," 2019, Recuperado: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>.
- [9] P. A. Vargas Porras, M. E. Orjuela Ramírez, and C. Vargas Porras, "Musculoskeletal disorders of the upper and the lumbar region: Demographic and occupational characterization, universidad nacional de colombia, bogotá 2001-2009," *Enferm. Glob.*, vol. 12, no. 4, pp. 119–133, 2013.
- [10] A. Galeazzo and A. Furlan, "Lean bundles and configurations: a fsQCA approach," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 38, no. 2, pp. 513–533, 2018.
- [11] G. Urrútia and X. Bonfill, "Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis," *Med. Clin. (Barc.)*, vol. 135, no. 11, pp. 507–511, 2010.
- [12] R. Ramírez Vélez, F. Meneses-Echavez, and M. E. Floréz-López, "Una propuesta metodológica para la conducción de revisiones sistemáticas de la literatura en la investigación biomédica," *Rev. CES Mov. y Salud*, vol. 1, no. 1, pp. 61–73, 2013.
- [13] C. Schardt, M. Adams, T. Owens, S. Keitz, and P. Fontelo, "Utilization of the PICO framework of improve searching PubMed for clinical question," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 7, p. 16, 2007.
- [14] E. Landa-Ramírez, A. De, and J. Arredondo-Pantaleón, "Herramienta pico para la formulación y búsqueda de preguntas clínicamente relevantes en la psicooncología basada en la evidencia," *Psicooncología*, vol. 11, pp. 259–270, 2014.
- [15] B. Du, S. Fischer, and A. Yazdani, "An Approach to Inject HFE into Existing Design Standards," *20th Congress of the International Ergonomics Association, IEA 2018*, vol. 824. Springer Verlag, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada, pp. 1230–1235, 2019.
- [16] C. Varianou-Mikellidou, G. Boustras, O. Nicolaidou, C. Dimopoulos, I. Anyfantis, and P. Messios, "Work-related factors and individual characteristics affecting work ability of different age groups," *Saf. Sci.*, vol. 128, 2020.
- [17] G. Wilhelmus Johannes Andreas and E. Johansson, "Observational Methods for Assessing Ergonomic Risks for Work-Related Musculoskeletal Disorders. A Scoping Review," *Rev. Ciencias la Salud*, vol. 16, no. Special Issue, pp. 8–38, 2018.
- [18] I. Rivilis *et al.*, "Effectiveness of participatory ergonomic interventions on health outcomes: A systematic review," *Appl. Ergon.*, vol. 39, no. 3, pp. 342–358, 2008.
- [19] S. Heydaryan, J. S. Bedolla, and G. Belingardi, "Safety design and development of a human-robot collaboration assembly process in the automotive industry," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, 2018.

- [20] W. P. Neumann, J. Winkel, G. Palmerud, and M. Forsman, "Innovation and employee injury risk in automotive disassembly operations," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 9, pp. 3188–3203, 2018.
- [21] N. E. Peterson, J. R. Sirard, P. A. Kulbok, M. D. Deboer, and J. M. Erickson, "Validation of Accelerometer Thresholds and Inclinometry for Measurement of Sedentary Behavior in Young Adult University Students," *Res. Nurs. Heal.*, vol. 38, no. 6, pp. 492–499, 2015.
- [22] J. Bassett D.R., B. E. Ainsworth, A. M. Swartz, S. J. Strath, W. L. O'Brien, and G. A. King, "Validity of four motion sensors in measuring moderate intensity physical activity," *Med. Sci. Sp. Exe.*, vol. 32, no. 9., pp. S471–S480, 2000.
- [23] Y.-K. Kong, S.-Y. Lee, K.-S. Lee, and D.-M. Kim, "Comparisons of ergonomic evaluation tools (ALLA, RULA, REBA and OWAS) for farm work," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 24, no. 2, pp. 218–223, 2018.
- [24] L. Botti, C. Mora, and A. Regattieri, "Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 111, pp. 481–491, 201.
- [25] V. Seth, R. Lee Weston, and A. Freivalds, "Development of a cumulative trauma disorder risk assessment model for the upper extremities," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 23, no. 4, pp. 281–291, 1999.
- [26] J. M. Kapellusch, A. Garg, K. T. Hegmann, M. S. Thiese, and E. J. Malloy, "The strain index and ACGIH TLV for HAL: Risk of trigger digit in the WISTAH prospective cohort," *Hum. Factors*, vol. 56, no. 1, pp. 98–111, 2014.
- [27] M. Douwes and H. De Kraker, "HARM overview and its application: Some practical examples," *Work*, vol. 41, no. SUPPL.1, pp. 4004–4009, 2012.
- [28] W. M. Keyserling, M. Brouwer, and B. A. Silverstein, "A checklist for evaluating ergonomic risk factors resulting from awkward postures of the legs, trunk and neck," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 9, no. 4, pp. 283–301, 199.
- [29] A. Klusmann, U. Steinberg, F. Liebers, H. Gebhardt, and M. A. Rieger, "The Key Indicator Method for Manual Handling Operations (KIM-MHO) - Evaluation of a new method for the assessment of working conditions within a cross-sectional study," *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 11, 2010.
- [30] A. Klußmann, H. Gebhardt, M. Rieger, F. Liebers, and U. Steinberg, "Evaluation of objectivity, reliability and criterion validity of the Key Indicator Method for Manual Handling Operations (KIM-MHO), draft 2007," *Work*, vol. 41, no. SUPPL.1, pp. 3997–4003, 201.
- [31] D. Kee and W. Karwowski, "LUBA: An assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time," *Appl. Ergon.*, vol. 32, no. 4, pp. 357–366, 2001.
- [32] E. Occhipinti, "OCRA: A concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs," *Ergonomics*, vol. 41, no. 9, pp. 1290–1311, 199.
- [33] M. Gómez-Galán, J. Pérez-Alonso, Á.-J. Callejón-Ferre, and J. López-Martínez, "Musculoskeletal disorders: OWAS review," *Ind. Health*, vol. 55, no. 4, pp. 314–337, 2017.
- [34] B. Buchholz, V. Paquet, L. Punnett, D. Lee, and S. Moir, "PATH: A work sampling-based approach to ergonomic job analysis for construction and other non-repetitive work," *Appl. Ergon.*, vol. 27, no. 3, pp. 177–187, 1996.
- [35] K. Kemmlert, "A method assigned for the identification of ergonomic hazards - PLIBEL," *Appl. Ergon.*, vol. 26, no. 3, pp. 199–211, 1995, doi: 10.1016/0003-6870(95)00022-5.
- [36] P. Simonsson and R. Rwamamara, "Ergonomic exposures from the usage of conventional and self compacting concrete," in *17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC17*, 2009, pp. 81–90, Recuperado: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84856627466&partnerID=40&md5=621ff3740e6d78e75c41c13937d39f97>.
- [37] L. M. Rose, J. Eklund, L. Nord Nilsson, L. Barman, and C. M. Lind, "The RAMP package for MSD risk management in manual handling - A freely accessible tool, with website and training courses," *Appl. Ergon.*, vol. 86, 2020.
- [38] M. Brito and M. A. Gonçalves, "ErgoSMED: A Methodology to Reduce Setup Times and Improve Ergonomic Conditions," *2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design: Future Trends and Applications, IHSED 2019*, vol. 1026. Springer Verlag, CIDEM - Research Center of Mechanical Engineering, School of Engineering of Porto (ISEP), Polytechnic of Porto, Porto, 4200-072, Portugal, pp. 549–554, 2020.
- [39] D. Högberg, E. Brolin, and L. Hanson, "Concept of formalized test procedure for proactive assessment of ergonomic value by digital human modelling tools in lean product development," *AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Simulation and Modeling, 2017*, vol. 591. Springer Verlag, School of Engineering Science, University of Skövde, Skövde, 541 28, Sweden, pp. 425–436, 201.
- [40] J. S. Moore and A. Garg, "The strain index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 56, no. 5, pp. 443–458, 1995.
- [41] M. N. Abdol Rahman, M. S. Muhamad Jaffar, M. F. Hassan, M. Z. Ngali, and O. Pauline, "Exposure level of ergonomic risk factors in hotel industries," in *Conference Series: Materials Science and Eng. 2017*, vol. 226, no. 1, 2018.
- [42] J. B. S. D. Santos-Neto and A. P. C. S. Costa, "Enterprise maturity models: a systematic literature review," *Enterp. Inf. Syst.*, vol. 13, no. 5, pp. 719–769, 2019.
- [43] T. Sakthi Nagaraj, R. Jeyapaul, K. E. K. Vimal, and K. Mathiyazhagan, "Integration of human factors and ergonomics into lean implementation: ergonomic-value stream map approach in the textile industry," *Prod. Plan. Control*, vol. 30, no. 15, pp. 1265–1282, 2019.
- [44] M. Leyer, M. Reus, and J. Moormann, "How satisfied are employees with lean environments?," *Prod. Plan. Control*, 2020.

- [45] T. Koukoulaki, "The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: An examination of sociotechnical trends over 20 years," *Appl. Ergon.*, vol. 45, no. 2, A, SI, pp. 198–212, Mar. 2014.
- [46] A. Sobhani, M. I. M. Wahab, and W. P. Neumann, "Investigating work-related ill health effects in optimizing the performance of manufacturing systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 241, no. 3, pp. 708–718, 2015.
- [47] K. Hoffmeister, A. Gibbons, N. Schwatka, and J. Rosecrance, "Ergonomics Climate Assessment: A measure of operational performance and employee well-being," *Appl. Ergon.*, vol. 50, pp. 160–169, 2015.
- [48] G. L. Tortorella *et al.*, "Early management of human factors in lean industrial systems," *Appl. Ergon.*, vol. 58, no. 3, pp. 992–997, Mar. 2019.
- [49] G. L. Tortorella, L. L. Vergara, E. P. Ferreira, and C. E. Fries, "Lean manufacturing and socio-technical and ergonomics practices implementation," in *IEOM Detroit Conference, IEOM 2016*, 2016, pp. 72–84.
- [50] P. R. Jackson and S. Mullarkey, "Lean production teams and health in garment manufacture.," *J. Occup. Health Psychol.*, vol. 5, no. 2, pp. 231–245, 2000.
- [51] M. Gibson and B. Mrugalska, "Lean thinking practices in ergonomics in industrial sector," in *International Symposium Occupational Safety and Hygiene, SHO 2018*, 2018, pp. 529–534.
- [52] R. Conti, J. Angelis, C. Cooper, B. Faragher, and C. Gill, "The effects of lean production on worker job stress," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 26, no. 9, pp. 1013–1038, 2006.
- [53] M. Brito, A. L. Ramos, P. Carneiro, and M. A. Gonçalves, "Integration of lean manufacturing and ergonomics in a metallurgical industry," *Int. J. Occup. Environ. Saf.*, vol. 2, no. 2, pp. 21–31, 2018.
- [54] C. A. Sprigg and P. R. Jackson, "Call centers as lean service environments: Job-related strain and the mediating role of work design," *J. Occup. Health Psychol.*, vol. 11, no. 2, pp. 197–212, 2006.
- [55] S. K. Parker, "Longitudinal effects of lean production on employee outcomes and the mediating role of work characteristics," *J. Appl. Psychol.*, vol. 88, no. 4, pp. 620–634, 2003.
- [56] P. Srinivasa Rao and M. Niraj, "A case study on implementing lean ergonomic manufacturing systems (LEMS) in an automobile industry," in *IEOM Detroit Conference, IEOM 2016*, 2016, pp. 101–113.
- [57] T. S. Nagaraj, R. Jeyapaul, K. E. K. Vimal, and K. Mathiyazhagan, "Integration of human factors and ergonomics into lean implementation: ergonomic-value stream map approach in the textile industry," *Prod. Plan. I& Control*, vol. 30, no. 15, pp. 1265–1282, Nov. 2019.
- [58] G. Bouville and D. Alis, "The effects of lean organizational practices on employees' attitudes and workers' health: evidence from France," *Int. J. Hum. Resour. Manag.*, vol. 25, no. 21, pp. 3016–3037, 2014.
- [59] L. Botti, C. Mora, F. Piana, and A. Regattieri, "The impact of ergonomics on the design of hybrid multi-model production lines in lean manufacturing," *AHFE 2017 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing: Managing Enterprise of the Future, 2017*, vol. 606. Springer Verlag, Department of Industrial Engineering, University of Bologna, viale del Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italy, pp. 167–178, 2018.
- [60] I. L. Nunes, "Integration of Ergonomics and Lean Six Sigma. A Model Proposal," *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 890–897, 2015.
- [61] Z. G. dos Santos, L. Vieira, and G. Balbinotti, "Lean Manufacturing and Ergonomic Working Conditions in the Automotive Industry," *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 5947–5954, 2015.
- [62] R. C. P. Capistrano and M. I. Norona, "Workplace Design Improvement for Cable Tray Production in an Electrical Equipment Company: A Lean Perspective," in *2nd International Conference on Management Science and Industrial Engineering, MSIE 2020*, 2020, pp. 97–104.

Aplicación de un modelo de ruteo de vehículos de dos eslabones para mejorar el proceso de aprovisionamiento y distribución en una cadena de suministros agroindustrial

José Ruiz-Meza¹

Yessica V. Quiroga-Bárcenas²

María C. Vásquez-Monterroza³

Gean Mendoza⁴

¹ *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*

²⁻⁴ *Corporación Universitaria del Caribe*

Colombia

La entrega oportuna y a tiempo de los productos hace parte de los objetivos de la logística, y para ello, en el proceso del transporte, los modelos asociados al ruteo de vehículos se han empleado como herramienta para mejorar su eficiencia. En este capítulo se presenta un modelo de ruteo de vehículos de dos eslabones, entregas divididas, flota heterogénea y ventanas de tiempo duras, capacitado para mejorar el proceso de distribución de la yuca industrial en el municipio de Corozal, Colombia. Se abordan tres eslabones de la cadena productiva: producción, aprovisionamiento y clientes asociados a la transformación de la yuca industrial. Adicionalmente, se desarrollaron dos escenarios para evaluar el comportamiento del modelo, en los que se evidencia una disminución de 15,86% y 1,28% respectivamente, con relación a los costos iniciales.

¹ Contacto: jose.ruiz@unad.edu.co; joserume@unisabana.edu.co

² Contacto: yessica.quiroga@cecar.edu.co

³ Contacto: maria.vasquezmo@cecar.edu.co

⁴ Contacto: gean.mendoza@cecar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Desde siempre las personas han cultivado alimentos y se ven en la necesidad de transportarlos a otros lugares en donde son de difícil adquisición. Por lo cual, el proceso de transporte es requerido para poder cumplir con los objetivos de la logística. Sin embargo, las cadenas de suministro presentan innumerables contratiempos y poca innovación en sus procesos, lo que genera la necesidad de incorporar tecnologías que garanticen menores costos y un flujo de transporte eficiente hasta el consumidor final [1]; entre los problemas generales que se dan en la cadena de suministro se encuentran los asociados a los pronósticos de demanda, la gestión de inventarios, la planificación de la producción, y organización del transporte [2]. Este último, se refleja en elevados costos, complejidad de planificación, necesidad de respuestas rápidas y eficientes, que afectan de manera directa a toda la cadena de suministros [3].

El transporte consiste en el traslado o movimientos de personas, productos y servicios desde un punto de origen a un destino final, o desde el principio de una cadena de suministro hasta el cliente [4]. Además, genera un valor agregado a los productos que son entregados de manera oportuna, sin daños y en las cantidades solicitadas. De igual modo, desempeña un rol crucial en la economía de un país, hasta el punto que determina el costo de un bien o servicio [5].

Dentro de las cadenas de suministro agroindustriales, el transporte impacta en la determinación de los costos. De igual modo, la importancia de la eficiencia de este proceso, se refleja en la atención que requiere este tipo de productos, debido a que, pueden perder su calidad y afectar los procesos de transformación [6]. En la cadena de suministro de la yuca industrial, el transporte debe ser eficiente y adecuado, además, se debe transportar la raíz en el menor tiempo posible para evitar perder propiedades del tubérculo con el paso de los días. Es por ello que, entre menor tiempo de cosecha y entrega, mayor será el beneficio para el productor [7]; la yuca como fuente principal de nutrientes para los seres humanos se clasifica en dos tipos: la dulce y la amarga (industrial) [8]. La principal diferencia entre estas dos es el elevado contenido de ácido cianhídrico y glucósidos cianogénicos de la yuca industrial, lo cual limita su uso solo a la industria [9].

En la optimización logística y operativa del transporte, los problemas de ruteo de vehículos VRP son los más utilizados en la industria e investigaciones de campo. El VRP, consiste en la organización de rutas en las cuales una flota de vehículos parte de un punto a visitar otros nodos para cumplir un servicio de carga y/o descarga. El objetivo varía con base al problema estudiado y se puede asociar a la minimización de costo, distancia recorrida, tiempo de distribución, entre otros [10]. Los VRPs incluyen restricciones y características propias que generan diversas variantes como capacidad limitada CVRP, ventanas de tiempos VRPTW, flota heterogénea HFVRP y entregas fraccionadas SDVRP, entre otras. Este tipo de modelos son desarrollados desde la investigación de operaciones mediante el uso de la programación lineal y la programación lineal entera mixta [11]. Los modelos con entregas fraccionadas consisten en que un cliente puede ser visitado por diferentes vehículos. Esta condición se estipula cuando el tamaño de las demandas de un nodo copa las capacidades de un solo vehículo [12].

En este documento, se realiza un modelo de ruteo de vehículos de dos eslabones con entregas fraccionadas, capacitado, flota heterogénea y con ventanas de tiempo duras (2E-SplitCHVRPTW) para mejorar la distribución de la yuca industrial disminuyendo los costos implicados en el ruteo. El modelo se desarrolla como un caso estudio de la cadena de suministro de la yuca industrial en el municipio de Corozal, Sucre. Adicionalmente, se evalúan dos escenarios que permiten simular situaciones de la cadena. Los eslabones de la cadena que hacen parte del estudio son los productores, acopio y clientes (empresas transformadoras). Cabe resaltar, que la propuesta de la ubicación del centro de acopio para este caso problema se toma con base en [13].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Cadena de suministro agroindustrial

Las cadenas de suministros agroindustriales están integradas generalmente por proveedores, productores agroindustriales, comercializadores mayoristas, minoristas y el consumidor final [14]. La buena gestión en

este tipo de cadenas conlleva a reducir la incertidumbre asociada a la disponibilidad de insumos, mayor calidad del producto, reducción de los riesgos de comercialización, mayor regularidad en los suministros de los productos agrícolas, mejor coordinación en la entrega de productos, flexibilidad, entre otros [15]. Por otra parte, la cadena de suministro de la yuca industrial agrupa diversas operaciones pasando por las actividades de precosecha, cosecha y poscosecha. Las cuales involucra eslabones de abastecimiento, producción, cosecha, poscosecha y venta; el primer eslabón comprende a los proveedores de insumos agrícolas, el segundo, tercer y cuarto, incluye los productores del tubérculo y finalmente, el último, lo integran los distribuidores, transportistas y transformadores [16].

2.2 Ruteo de Vehículos

El desarrollo de VRPs para modelar problemas de transporte ayuda en la toma de decisiones [17]. El VRP fue primeramente introducido a la literatura por Dantzing y Ramser en el año 1959. El modelo consistió en establecer la ruta óptima de una flota de camiones que repartían gasolina a las estaciones de servicio [18]. Posterior a ello, a medida que los problemas se ajustaban a la realidad y a diversos contextos, se agregaron diversas variantes entre ellas, las entregas fraccionada; a diferencia del VRP tradicional, en el SDVRP los clientes pueden ser atendidos por varios vehículos durante la ruta [12].

En [19] desarrollan un SDVRP que minimiza el número de vehículos que se utilizan para satisfacer la demanda de los clientes y a su vez, usan vehículos con menor capacidad. En [20] realiza una metaheurística para resolver el SDVRP generando resultados que aumentan en un 30% la eficiencia en la utilización de los recursos de transporte en las empresas de transporte de carga por carretera. En [21] desarrollan un modelo con entregas divididas para el transporte marítimo de contenedores. El objetivo consiste en realizar una asignación eficiente de los contenedores a las barcas y posteriormente, realizar un ruteo para la entrega a tiempo. El modelo es resuelto a través de un algoritmo híbrido de búsqueda local y ramificación y corte. Por otra parte, en cuanto a modelos de ruteo que consideran dos eslabones, [22] desarrollaron un problema de ruteo de vehículos para minimizar los costos asociados. Se desarrollaron tres rigurosas heurísticas para generar soluciones eficientes.

En [23] desarrollaron un modelo que considera la distancia, velocidad, carga y emisiones en el proceso de transporte. El modelo se puso en práctica en una cadena de supermercados holandeses. En [24] desarrollan un algoritmo heurístico para solucionar un modelo de ruteo con ventanas de tiempo, múltiples viajes y sincronización. En [25] se incorporan restricciones logísticas propias de un modelo de ruteo capacitado de dos eslabones con el objetivo de minimizar los costos. Para resolver el modelo, el autor utiliza un método híbrido. En [26] desarrollan un modelo multi producto de dos eslabones. Los autores dividen el ruteo de cada eslabón similar al enfoque propuesto en esta investigación y posteriormente, unen los eslabones a través de restricciones de movimiento de mercancía.

3. MÉTODO

3.1 Área de estudio

El municipio de Corozal hace parte de la Subregión Sabanas del Departamento de Sucre y se ubica en la región norte de Colombia (Figura 1). En cuanto a la producción agrícola, es uno de los mayores productores de yuca industrial en el departamento con una producción de 15.900 ton en el año 2018 que representan un 21,4% frente a la producción departamental. La producción de Sucre es de 74.295 ton en el 2018, aportando el 37.96% de la producción nacional [27].

3.2 Metodología

El desarrollo de la investigación consiste en el análisis del estado actual del transporte de la yuca industrial. Para ello, se diagnostica el proceso de aprovisionamiento y transformación que comprende los eslabones de productores, acopio y empresas transformadoras como clientes. Los productores son quienes realizan actividades propias para la producción del tubérculo, como siembra y cultivo. El centro de acopio es el lugar donde se reúne la cosecha de los productores y los clientes son identificados como las empresas

transformadoras. Para el proceso de transporte, se considera el envío del tubérculo desde el productor hasta el centro de acopio y posteriormente, desde el centro de acopio hasta los clientes. Se diseña, valida y aplica un instrumento para la recolección de datos con el objetivo tenerlos como insumo para el modelo. Posteriormente, se construye un modelo matemático de programación lineal entera mixta el cual es codificado a través del software General Algebraic Model System (GAMS) y resuelto con el solver CPLEX. El modelo se valida con los datos obtenidos en la caracterización del municipio de Corozal y finalmente, se desarrollan dos escenarios para evaluar condiciones futuras.



Figura 1. Ubicación del municipio de Corozal

4. RESULTADOS

4.1 Modelo matemático

Considerando los problemas de transporte que se presentan en la cadena de suministro de la yuca industrial, se desarrolla un modelo 2E-SplitCHVRPTW para minimizar los costos en el proceso de aprovisionamiento-distribución (Figura 2). Los productores están representados por el conjunto de nodos $i_a = \{1, 2, 3, \dots, a\}$, el centro de acopio $i_b = b$ y los clientes $i_c = \{1, 2, 3, \dots, c\}$. Por lo cual, $V = i_a + i_b + i_c$. Finalmente, los vehículos $m = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ corresponden al nivel productores-acopio y $k = \{1, 2, 3, \dots, K\}$ para el nivel acopio-cliente. Los índices, conjuntos, parámetros y variables del modelo se observan en las Tablas 1, 2 y 3.

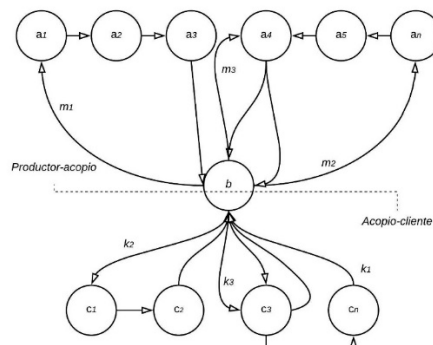


Figura 2. Modelo conceptual 2E-SplitCHVRPTW

Tabla 1. Índices y conjuntos

Notación	Descripción	Notación	Descripción
$i, j, h \in V$	Conjunto de nodos	$i_c \in V$	Subconjunto de clientes/transformadores
$i_a \in V$	Subconjunto de productores	$m \in M$	Conjunto de vehículos de primer nivel
$i_b \in V$	Subconjunto de centro de acopio	$k \in K$	Conjunto de vehículos de segundo nivel

Tabla 2. Parámetros

Notación	Descripción	Notación	Descripción
D_i	Demanda del cliente i_c	$Q1_m, Q_k$	Capacidad de los vehículos m y k
W_i	Capacidad de producción de i_a	$V1_m, V_k$	Costo variable por uso vehículos m y k
WA_i	Capacidad del acopio i_b	C_{ij}	Matriz de costo de ir de i a j
$[a_i, b_i]$	Ventanas de tiempo	TT_{ij}	Matriz de tiempo de viaje de ir de i a j
S	Tiempo de servicio	M	Número grande

Tabla 3. Variables

Notación	Descripción		
X_{ijk}	Variable binaria. 1 Si se asigna el vehículo k en el arco ij . 0 de lo contrario		
Y_{ijm}	Variable binaria. 1 Si se asigna el vehículo m en el arco ij . 0 de lo contrario		
H_{ik}	Cantidad de producto a transportar de i_c con k	TS_{ik}	Tiempo de llegada a i_c con k
HH_{im}	Cantidad de producto a transportar de i_a con m	TSS_{im}	Tiempo de llegada a i_a con m

Para el 2E-SplitCHVRPTW, una solución es factible si cumple con las siguientes restricciones: i. cada cliente puede ser visitado más de una vez. ii. cada una de las rutas debe iniciar y finalizar en el mismo centro de acopio. iii. un vehículo debe ser asignado a una sola ruta. iv. la capacidad de los vehículos no puede excederse. El modelo matemático se desarrolla a continuación. Con la ecuación (1) se minimiza los costos fijos y variables del proceso de ruteo en ambos eslabones.

$$\min Z = \sum_{ij \in i_b + i_c} \sum_{k \in K} C_{ij} X_{ijk} + \sum_{ij \in i_a + i_b} \sum_{m \in M} C_{ij} Y_{ijm} + \sum_{ij \in i_b + i_c} \sum_{k \in K} V_k X_{ijk} + \sum_{j \in i_a + i_b} \sum_{m \in M} V1_m Y_{ijm} \quad (1)$$

Las ecuaciones (2) y (3) aseguran que un nodo puede ser visitado más de una vez.

$$\sum_{i \in i_b + i_c} \sum_{j \in i_c} X_{ijk} \geq 1 \quad \forall j \in i_c \quad (2)$$

$$\sum_{i \in i_a + i_b} \sum_{m \in M} Y_{ijm} \geq 1 \quad \forall j \in i_a \quad (3)$$

Las ecuaciones (4) y (5) aseguran el flujo entre nodos.

$$\sum_{i \in i_b + i_c} X_{ihk} = \sum_{j \in i_b + i_c} X_{hjk} \quad \forall k \in K, \forall h \in i_c \quad (4)$$

$$\sum_{i \in i_a + i_b} Y_{ihm} = \sum_{j \in i_a + i_b} Y_{hjm} \quad \forall m \in M, \forall h \in i_a \quad (5)$$

Las ecuaciones (6) y (7) aseguran que se cumpla con la demanda de los clientes y se recolecte la cosecha completa de los productores, respectivamente.

$$\sum_{k \in K} H_{ik} = D_i \quad \forall i \in i_c \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M} HH_{im} = W_i \quad \forall i \in i_a \quad (7)$$

Las ecuaciones (8) y (9) evitan que se exceda la capacidad del vehículo.

$$\sum_{i \in i_b + i_c} H_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in i_a + i_b} HH_{im} \leq Q1_m \quad \forall m \in M \quad (9)$$

Las ecuaciones (10) y (11) determinan la cantidad enviada y recolectada en cada arco ij y en cada eslabón, respectivamente.

$$\sum_{j \in i_b + i_c, i \neq j} X_{jik} D_i \geq H_{ik} \quad \forall k \in K, \forall i \in i_c \quad (10)$$

$$\sum_{j \in i_a + i_b, i \neq j} Y_{jim} W_i \geq HH_{im} \quad \forall m \in M, \forall i \in i_a \quad (11)$$

Las ecuaciones (12) y (13) calculan los tiempos de viaje en cada arco y en cada eslabón.

$$TS_{ik} \geq TS_{jk} + TT_{ij} + S - M(1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K, \forall i \in i_c : i \neq j, \forall j \in i_b + i_c : j \neq i \quad (12)$$

$$TSS_{im} \geq TSS_{jm} + TT_{ij} + S - M(1 - Y_{ijm}) \quad \forall m \in M, \forall i \in i_a : i \neq j, \forall j \in i_a + i_b : j \neq i \quad (13)$$

Las ecuaciones (14) y (15) aseguran el cumplimiento de las ventanas de tiempo.

$$a_i \leq TS_{ik} \leq b_i \quad \forall k \in K, \forall i \in i_c \quad (14)$$

$$a_i \leq TSS_{im} \leq b_i \quad \forall m \in M, \forall i \in i_a \quad (15)$$

La ecuación (16) asegura que no se exceda la capacidad del centro de acopio.

$$\sum_{i \in i_c} \sum_{k \in K} H_{ik} \leq WA_j \quad \forall j \in i_b \quad (16)$$

La ecuación (17) garantiza que las cantidades que envían los productores sean mayor igual a la demanda de los clientes.

$$\sum_{i \in i_c} \sum_{m \in M} HH_{im} \geq \sum_{i \in i_c} D_i \quad (17)$$

Las ecuaciones (18) y (19) evitan la creación de sub-tours.

$$U_i - U_j + nX_{ijk} \leq n - 1 \quad \forall i \in i_b + i_c, \forall j \in i_c \quad (18)$$

$$U_i - U_j + nY_{ijm} \leq n - 1 \quad \forall i \in i_a + i_b, \forall j \in i_a \quad (19)$$

Finalmente, las ecuaciones (20) y (21) definen la naturaleza de las variables.

$$X_{ijk}, Y_{ijm} \in [0, 1] \quad \forall i \in V, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (20)$$

$$H_{ik}, HH_{im}, TS_{ik}, TSS_{im} \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (21)$$

4.2 Experimentos computacionales

El modelo fue codificado en el software GAMS y resuelto usando el solver CPLEX en un computador con 20GB de RAM, procesador Intel Core i7-8565U CPU@ 1.8 GHz, disco duro de 1-TB y sistema operativo de 64-bit. Se logró acceder a la información de 14 productores de yuca industrial, un centro de acopio, tres clientes potenciales, 45 vehículos disponibles en la ruta productores - acopio y 40 vehículos disponibles en la ruta acopio-clientes. La capacidad de producción para los productores $i_a = \{1, 2, 3, \dots, 14\}$ identificados, corresponde a 150, 150, 90, 40, 30, 30, 10, 5, 4, 4, 4, 3, 3, 2 ton, respectivamente. La demanda de los clientes $i_c = \{1, 2, 3\}$ corresponde a 187, 170, 150 ton, respectivamente. La capacidad de los vehículos k y m en cada eslabón son de 12 y 15 ton. Finalmente, la capacidad del centro de acopio $i_b = 1.200$ ton.

En la Figura 3 se muestra el ruteo resultante para el municipio de Corozal entre los eslabones productor - acopio y acopio - clientes. Se observan ruteos que abarcan varios nodos como es el caso del vehículo $k = 13$

en la ruta productor-acopio. Esta ruta sigue la secuencia $i_b - 12 - 11 - 9 - i_b$. Ahora bien, existen diversos productores (sombreado azul en la figura 3) que por su capacidad de producción, requieren ser visitados por más de un vehículo (e.g., el productor uno $i_a = 1$ requiere de 14 vehículos para enviar su producción, debido a su alta capacidad de producción). Para satisfacer el cumplimiento de las rutas, se emplearon 39 vehículos en la ruta productores - acopio y 38 vehículos en la ruta acopio-clientes.

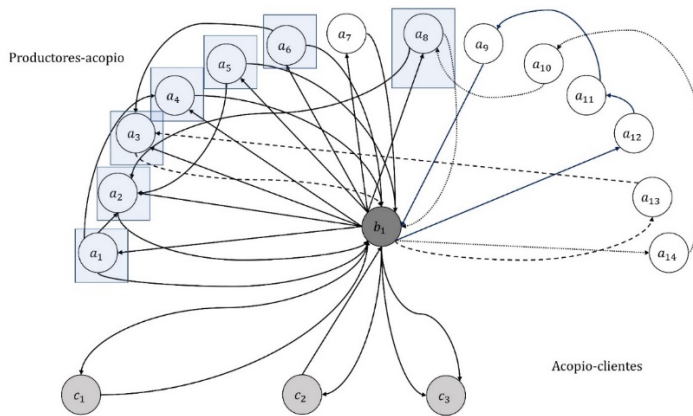


Figura 3. Resultados del ruteo en Corozal

4.3 Análisis de escenarios

Una vez realizada la validación del modelo del ruteo de la yuca industrial empleando datos reales del municipio de Corozal, se procede a realizar una evaluación a través de nuevos escenarios hipotéticos. El primer escenario se fundamenta en disminuir la demanda del cliente en un 20% con relación al modelo inicial, con la intención de conocer la cantidad a acopiar y distribuir. El segundo escenario se basa en establecer unas capacidades mínimas que se deben enviar al centro de acopio.

4.2.1 Primer escenario

En este escenario se considera una disminución de la demanda de los clientes del 20% con respecto a la demanda real, con el fin de mirar el comportamiento de los costos. La nueva distribución de demandas de los clientes $i_c = \{1, 2, 3\}$ corresponde a 149, 139, 120 ton, respectivamente. Los resultados se observan en la Figura 4.

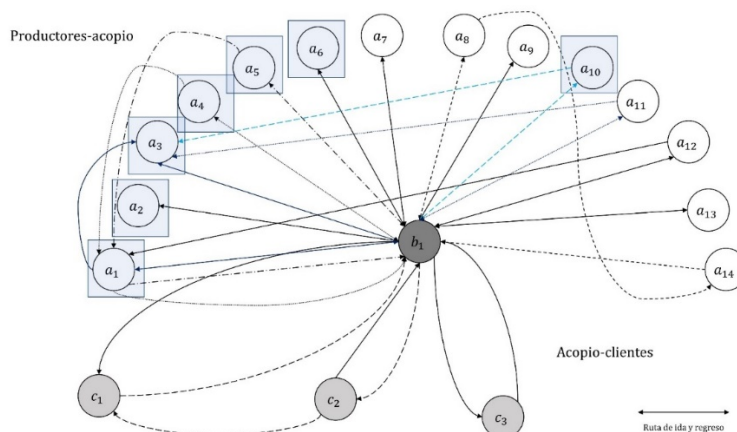


Figura 4. Resultados del ruteo para el primer escenario

A diferencia de la ruta inicial (Figura 3), en este nuevo ruteo existe una ruta realizada que conecta dos clientes ($i_c = 1$ e $i_c = 2$). De igual modo, se observan ruteos que conectan dos nodos (secuencias $i_b - 5 - 1 - i_b$, $i_b - 4 - 1 - i_b$, $i_b - 1 - 3 - i_b$, $i_b - 8 - 14 - i_b$, $i_b - 11 - 3 - i_b$ e $i_b - 10 - 3 - i_b$). En total se requieren 29 vehículos en el eslabón acopio-cliente y 39 en el eslabón productor-acopio. Asimismo, se observa una conexión dada en la ruta de los clientes $i_b - c_2 - c_1 - i_b$.

4.2.2 Segundo escenario

Para el segundo escenario se plantea un acopio con requerimientos mínimos. Para ello, se hace necesario agregar un nuevo parámetro WAM_i que indica las capacidades mínimas del centro de acopio (capacidad mínima 515 toneladas). En ese sentido se agrega la ecuación (22) que asegura que las cantidades a transportar al acopio sean mayores o iguales a la capacidad mínima del mismo.

$$\sum_{i \in I_a + i_b} \sum_{m \in M} HH_{im} \geq WAM_i \quad \forall i \in i_b \quad (22)$$

En la Figura 5 se observa el ruteo resultante. En el caso de las rutas productores – acopio se evidencian ruteos que agrupan más de dos nodos como las secuencias $i_b - 14 - 10 - 8 - i_b$ e $i_b - 12 - 11 - 9 - i_b$. Otros ruteos agrupan dos nodos como $i_b - 1 - 2 - i_b$, $i_b - 8 - 2 - i_b$, $i_b - 13 - 3 - i_b$, $i_b - 5 - 2 - i_b$ e $i_b - 6 - 3 - i_b$. Para el caso de la ruta acopio – clientes, los vehículos visitan a los clientes y se devuelven.

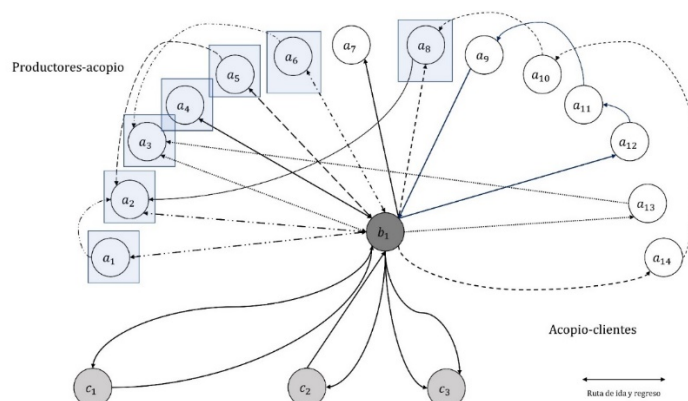


Figura 5. Resultados del ruteo para el segundo escenario

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El tiempo general para resolver el modelo y obtener soluciones con un gap menor al 10% con los datos reales (base y escenarios) fue de 8 horas. Esto comprueba la naturaleza Np-hard del modelo desarrollado; se hicieron pruebas con mayor tiempo computacional, sin embargo, excedieron las limitaciones del software GAMS. La solución con los datos base del municipio arrojó un costo total mínimo de \$ 9.615.000 COP con un gap de 9,2%. En el primer escenario el costo disminuye a \$ 8.090.000 COP con un gap de 8%. Finalmente, con el segundo escenario los costos resultantes son de \$9.492.000 COP, lo que refleja también una disminución monetaria con relación al modelo inicial, con un gap de 9%.

Los resultados generados en ambos escenarios demuestran que son mejores que el costo inicial. La diferencia porcentual es del 15,86% y 1,28% para los escenarios 1 y 2 respectivamente. De igual modo, los resultados del modelo demuestran el cumplimiento de cada una de las restricciones asociadas a las capacidades tanto de producción, como de acopio, las capacidades de los vehículos en cada eslabón y el cumplimiento de la demanda. Se observa que la obtención de rutas pequeñas o medianas depende de las cantidades a recolectar. Por lo cual, generalmente en las rutas visitadas, los vehículos partían del acopio a visitar un solo nodo. Sin embargo, en los nodos que presentan una menor capacidad de producción, se obtienen rutas que involucran dos o tres nodos de estos.

6. CONCLUSIONES

La cadena de suministro de la yuca industrial en el municipio de Corozal no tiene una distribución definida y se basa en un ruteo empírico. El municipio carece de centros de acopio ubicados estratégicamente para recolectar el producto. Por lo cual, en este trabajo se diseñó un modelo matemático de programación lineal entera mixta de dos eslabones con flota heterogénea, capacitadas, ventanas de tiempos duras y entregas fraccionadas, para minimizar los costos de recolección y distribución. En el modelo se consideraron 14

productores de yuca industrial y tres clientes potenciales ubicados en Barraquilla, Medellín y Corozal. Adicionalmente, se propone ubicar un centro de acopio teórico con base en los resultados de la investigación de [13]. Los resultados arrojan unos costos de ruteo de \$ 9.615.000 COP. El modelo es ejecutado durante un tiempo máximo de 8 horas. El gap mínimo resultante es de 9,2%. No se logra disminuir el gap debido a la alta complejidad del modelo.

Posteriormente, se consideran dos escenarios para evaluar el comportamiento del modelo real frente a situaciones inciertas que pueden ocurrir dentro del mismo. Para el primer escenario se propuso una disminución del 20% en la demanda de los clientes con relación a la demanda real, lo cual dio como resultado una disminución significativa en los costos del 15,86% (\$1.525.000 COP) por debajo del costo inicial. Esta situación es esperada, porque al disminuir los requerimientos, disminuyen los viajes y, por ende, los costos asociados. En el segundo escenario se planteó un centro de acopio con capacidades mínimas, con lo cual se obtuvo una disminución en cuanto a los costos del 1,28% (\$123.000 COP).

Para investigaciones futuras es necesario desarrollar algoritmos que permitan disminuir el tiempo de solución para este tipo de modelos complejos. De igual modo, se pueden incluir múltiples centros de acopio, variantes que consideren el cuidado del ambiente y aplicar ventanas de tiempos suaves con penalizaciones por incumplimiento. Finalmente, incluir otros costos como el de cargue y descargue, alistamiento del vehículo, entre otros que hagan parte del ruteo.

REFERENCIAS

- [1] X. Budet y A. Perez, "Innovaciones tecnológicas en la cadena de suministro aplicadas al eCommerce," *Reality*, vol. 168, p. 168, 2019.
- [2] S. Jharkharia y M. Shukla, "Agri-fresh produce supply chain management: A state-of-the-art literature review," *Resolution*, vol. 157, p. 157, 2016.
- [3] A. Gómez Palacio, "Evolución del transporte terrestre de carga en Colombia y su impacto en empresas del sector industrial del Valle de Aburrá," Universidad EAFIT, 2016.
- [4] J. Ruiz-Meza, I. Montes, A. Pérez y M. Ramos-Márquez, "VRP model with time window, multiproduct and multidepot," *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 23, no. 2, 2020.
- [5] J. B. Garcia, H. L. Castano, C. E. Posada, C. B. Ruiz y J. G. Guzman, "Economía colombiana," *EAFIT*, no. 1, p. 80, 2015.
- [6] A. Souza, "Logística en cadenas de producción agroindustrial," *Rev. Científica Multidiscip. Núcleo do Conhecimento*, vol. 6, no. 8, pp. 33-54, 2019.
- [7] Almidones de sucre S.A.S, "Cartilla de manejo Integral de la Yuca Industrial," Corozal, 2015.
- [8] R. Howeler, N. Lutaladio y G. Thomas, *Save and grow: cassava. A guide to sustainable production intensification*. FAO, 2013.
- [9] J. A. Montagnac, C. R. Davis y S. A. Tanumihardjo, "Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement," *Compr. Rev. food Sci. food Saf.*, vol. 8, no. 3, pp. 181-194, 2009.
- [10] Y. Velásquez, "Análisis de las características y aplicaciones de los sistemas de ruteo de vehículos," *Industrial*, vol. 3, no. 2, pp. 54-67, 2015.
- [11] M. Nematollahi y A. Tajbakhsh, "Past, present, and prospective themes of sustainable agricultural supply chains: A content analysis," *J. Clean. Prod.*, p. 122201, 2020.
- [12] L. Babilonia, E. Gonzales y J. Orjuela, "State of the art review of the vehicle routing problem: A historic account with solving methods," *Seventh Int. Symp. Precis. Eng. Meas. Instrum.*, vol. 8321, no. 2, p. 83213U, 2011.
- [13] G. Mendoza, "Modelo de localización de múltiples instalaciones como soporte estratégico a las operaciones logísticas en una cadena de suministro agroalimentaria," Universidad Tecnológica de Bolívar, 2018.
- [14] M. Bernal y Y. Diaz, "Modelo para la gestión de capacidades logísticas en la cadena de suministro agroindustrial frutícola en Bogotá, Cundinamarca," 2016.
- [15] A. Moreno, A. Caicedo y J. Orjuela, "External Integration on Agri-Food Supply Chain: A review to the state of the arte," *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.*, vol. 1673, no. 3, pp. 194-200, 2015.
- [16] E. Márquez-Suárez y M. A. Olarte-Lasso, "Análisis de la cadena productiva y la implementación de tecnología en el cultivo de la yuca en Colombia." Universidad del Rosario, 2017.
- [17] R. Baldacci, A. Mingozzi y R. Roberti, "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints," *EServier*, pp. 1-6, 2012.
- [18] D. Batero, "Modelo matemático multi-objetivo de ruteo e inventarios para la cadena de suministro de perecederos: caso sector fruticola," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [19] J. Sepúlveda, J. W. Escobar y W. Adarme, "An algorithm for the routing problem with split deliveries and time windows (SDVRPTW) applied on retail SME distribution activities," *Dyna*, vol. 81, no. 187, pp. 223-231, 2014.

- [20] Y. Hernandez, "Diseño de un sistema de ruteo de vehiculos con multiples depositos en empresas de transporte de carga por carretera," *Nusa*, vol. 5, no. 1, pp. 1689–1699, 2016.
- [21] S. Fazi, J. C. Fransoo, T. Van Woensel y J. X. Dong, "A variant of the split vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups for inland container shipping in dry-port based systems," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 142, no. September, p. 102057, 2020.
- [22] V. Nguyen, C. Prins y C. Prodhon, "Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 216, no. 1, pp. 113–126, 2012.
- [23] M. Soysal, J. M. Bloemhof-Ruwaard y T. Bektaş, "The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 164, pp. 366–378, 2015.
- [24] P. Grangier, M. Gendreau, F. Lehuédé y L. M. Rousseau, "An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 254, no. 1, pp. 80–91, 2016.
- [25] A. Niño, "Estudio del problema de ruteo de vehiculos de dos escalones," Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [26] N. Dellaert, T. Van Woensel, T. G. Crainic y F. Dashty Saridarq, "A multi-commodity two-Echelon capacitated vehicle routing problem with time windows: Model formulations and solution approach," *Comput. Oper. Res.*, vol. 127, p. 105154, 2021.
- [27] Agronet, "Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo," 2018.

Análisis de caso de la gestión turística para la construcción de instancias requeridas en el diseño de itinerarios de viaje

José Ruiz-Meza¹

Ana Castro-Vergara²

Jairo Martínez Banda³

Jairo R. Montoya-Torres⁴

¹⁻³ *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*

⁴ *Universidad de La Sabana*

Colombia

En Colombia existen diferentes zonas con alto potencial turístico, como el departamento de Sucre. Su división geográfica en cinco subregiones conlleva a presentar cinco espacios de cultura, economía, historia y ecosistemas distintos, haciéndolo atractivo para los turistas. Sin embargo, la crisis generada por el coronavirus SARS-CoV-2, sumada a la baja competitividad del turismo, impactó negativamente el desarrollo económico de este sector. En este capítulo se realiza un análisis de la cadena de suministro de turismo de Sucre para determinar el estado actual de las capacidades de oferta. Adicionalmente, se construye bases de datos a partir de la información recolectada y estructurada, como insumo para el diseño de modelos matemáticos de gestión de itinerarios turísticos. En total se generan 14 instancias pequeñas, medianas y grandes con la información de la cadena, las cuales pueden ser abordadas desde el problema de diseño de rutas turísticas modelado como un Team Orienteering Problem con Time Windows.

¹ Contacto: joserume@unisabana.edu.co, jose.ruiz@unad.edu.co

² Contacto: anam.castrov@unad.edu.co

³ Contacto: jairo.martinez@unad.edu.co

⁴ Contacto: jairo.montoya@unisabana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El sector turismo es uno de los más afectados por la actual crisis económica y de salud derivada por la pandemia del Covid-19 [1]. La limitación de los viajes nacionales e internacionales en diferentes países supone una fuerte caída en las cifras de arribos de turistas no residenciales y locales en todo el mundo. Estas cifras hasta 2019 habían mostrado un aumento creciente y constante (1.235 millones de llegadas de turistas internacionales en 2016, 1.326 millones en 2017, 1.451 millones en 2018 y aproximadamente, 1.500 millones en 2019) [2–5]. Esta disminución ha afectado significativamente el bienestar socioeconómico de las organizaciones de la Cadena de Suministro del Turismo CST y a los turistas; se han generado recortes de personal en las aerolíneas, existe una alta tasa de desocupación hotelera y en todos los demás sitios dedicados al hospedaje de turistas [6].

De igual modo, se han cerrado museos, establecimientos culturales, religiosos, y otros puntos de interés POI para el turismo como lo son las playas [6, 7]. Por otra parte, existen diferentes efectos directos e indirectos sobre el ambiente que se han generado en la actual pandemia que favorecen al turismo (e.g., disminución de la contaminación de las playas y cuerpos de agua, disminución de la contaminación acústica, emisiones de carbono, y mejoramiento de la calidad ambiental y del aire) [8].

En Colombia, los datos actuales de arribos de turistas extranjeros no residentes por modo aéreo, terrestre y marítimo, demuestran una caída abrupta de 4.352.086 en 2019 a 1.312.284 en 2020 y 83.449 hasta abril de 2021 [9]. La preocupación generada por la crisis actual se suma a diferentes problemas logísticos que ya demostraban obstáculos para el trabajo colaborativo en la CST y la mejora de su competitividad en diferentes regiones de Colombia. Sin embargo, la crisis económica puede tomarse como una oportunidad para reinventar el turismo y generar acciones que permitan fortalecerlo [10, 11].

En departamentos como Sucre, que a pesar de presentar un gran potencial turístico, se encuentra en los últimos puestos de competitividad turística; con base en el Índice de Competitividad Turística Regional de Colombia ICTRC, Sucre se ubicó en los últimos lugares considerándose como uno de los menos competitivos [12]. Esta situación se refleja por la falta de una estructura sólida que defina claramente la CST y la oferta de valor en esta región. Adicionalmente, la baja competitividad con base en los criterios económico, social, ambiental, cultural, estrategia de mercado, gestión de destino, empresarial, y de infraestructura, es latente a pesar de las estrategias consignadas en los diferentes documentos sectoriales y prospectivos del gobierno local y nacional.

Lo cual, afecta directamente a la gestión de la planificación de itinerarios turísticos [13]. Este tipo de gestión se enmarca en el nuevo cambio de turismo de masas a construcción de itinerarios personalizados (i.e., que el turista es quien realiza su propio proceso de planificación del viaje). Por lo cual, es necesario que se presente una información en tiempo real de los datos requeridos para el proceso de planificación tales como tiempos de viaje, distancias de viaje, sitios de interés, horarios y tiempos de visita, entre otros [14].

En este sentido, las decisiones por tomar con respecto al turismo deben considerar un cambio sustancial que no apunte solamente a los problemas derivados del Covid-19 y la reactivación de la economía en Sucre, sino que incluyan la solución a los diferentes problemas asociados a la CST anterior a la pandemia, tales como la gestión de los itinerarios personalizados. Por consiguiente, con el desarrollo de este capítulo se (i) realiza una caracterización de la actual cadena de valor del turismo en Sucre, en la actual situación derivada del Covid-19.

Con esta información, se construyen bases de datos (instancias) con información de cada POI, distancias de recorrido, tiempos de viaje, horarios, modos de transporte y beneficios (i.e., puntuación asignada a un POI como beneficio del turista por visitarlo), que sirven como insumos para la construcción de modelos matemáticos o de simulación para la eficiente toma de decisiones en la construcción de itinerarios; la información organizada de esta manera permite el desarrollo de modelos matemáticos y algoritmos de solución (heurísticas y metaheurísticas) que calculan rutas turísticas personalizadas y son base para la construcción de aplicaciones y guías móviles inteligentes MTG [15].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Cadena de Suministro del Turismo

Existen diferencias marcadas entre las cadenas de suministros de bienes y las cadenas de suministros de servicio CSS [16]. Las diferencias entre estos tipos de cadenas radican en que la CSS presenta características de intangibilidad, simultaneidad, heterogeneidad y generalmente, los servicios son perecederos [16]. Por otra parte, los clientes deben estar presentes para poder recibir el servicio, el servicio puede ser muy personalizado y difícil de estandarizar, y finalmente, debe ser *consumido* al estar disponible [16, 17].

En este sentido, la CST que hace parte del grupo de las CSS, presenta una definición particular por ser un sector dinámico, complejo y diferente de los demás sectores [18]. Según [19] es un conjunto de organizaciones de orden público y privado que articulan actividades de transporte (aéreo, terrestre, entre otros), servicios de alojamiento, distribución y venta del producto turístico en un destino. Adicionalmente, [20] agrega entre los componentes mencionados, la infraestructura que se requiere para dar soporte al destino turístico. Lo que demuestra que en esta industria existen diferentes sectores que se encargan de suministrar servicios convirtiéndolo en un sector heterogéneo de la economía. Por otra parte, los elementos de la oferta del turismo (productos, servicios y experiencias ofrecidas) se encuentran en un destino fijo mientras la población que los consume es móvil [18, 21].

La CST se desenvuelve en el marco de sectores públicos y privados [22]. La estructura incluye a nivel general proveedores de primer y segundo nivel, operadores turísticos, agentes de viajes, y los turistas, siendo estos últimos, a diferencia de otras cadenas de suministro, los que fluyen hacia los proveedores e intermediarios [19, 23]. Adicionalmente, la estructura y diseño de los productos se realizan conforme a los requerimientos de los turistas [24]. Dentro de los operadores de primer nivel se encuentran las entidades encargadas de brindar servicio directo a los intermediarios o al turista, tales como alojamiento, transporte, alimentación, ventas de souvenir, bares y sitios para la realización de actividades turísticas (e.g., museos, parques, sitios de excursiones, instalaciones deportivas, entre otros) [20, 25]. Por otra parte, los proveedores de segundo nivel son los encargados de suministrar el agua, fluido eléctrico, manufactura, recolección de residuos sólidos, entre otras actividades que impactan indirectamente al turismo [20].

Los operadores turísticos y agentes de viajes pueden conformar una misma o diferentes organizaciones, y juegan un rol crucial como intermediarios en la CST. Los primeros se encargan de la promoción y comercialización de los productos turísticos del destino ayudando a pequeños y medianos proveedores, la organización de paquetes turísticos, y el intercambio de información [26]. Estos actores se encargan de adquirir diferentes servicios de los proveedores (e.g., alojamiento, actividades turísticas, y transporte) y ensamblarlos en un solo paquete con precios incluso más asequibles [19, 26]. Así mismo, los agentes de viajes son minoristas que vinculan la oferta y la demanda [27]. Son expertos en los aspectos relevantes de un producto o destino turístico y en gran medida pueden influenciar en la elección del destino por su relación con los operadores turísticos y los turistas [28]. Finalmente, los turistas son las personas que consumen los servicios y productos turísticos.

2.2 Diseño de rutas turísticas

Los turistas acostumbran a planificar viajes de acuerdo con sus preferencias personales y la información de los sitios de interés. Para el diseño de la mejor ruta se consideran las limitaciones temporales, de presupuesto, beneficio, entre otros aspectos relevantes para el turista. Sin embargo, pensar en todo esto convierte a la planificación en un proceso complejo [29]. Desde el campo de la investigación de operaciones se han desarrollado modelos matemáticos para abordar este tipo de problemas denominado Tourist Trip Design Problem TTDP [14]. El TTDP pretende la construcción de un itinerario que permita maximizar el beneficio del turista sin exceder su presupuesto [14, 15].

La formulación y formalización más simple asociada al TTDP es el *Orienteering Problem* (OP) y el *Team Orienteering Problem* (TOP). El OP considera la planificación de una ruta que maximice el beneficio visitando diversos POIs (no es necesario visitarlos a todos y cada POI tiene un beneficio asociado). A diferencia del

OP, el TOP es utilizado para planificar simultáneamente un número de k -rutas [30]. Para resolver este problema se necesita conocer diferentes parámetros asociados a los tipos de POIs disponibles, el tiempo de viaje entre los diferentes POIs, los modos de transporte, el beneficio asociado a cada POI como función de la importancia o preferencia objetiva y subjetiva dada por el turista a los mismos.

De igual forma, el número de rutas a generar asociada con cada uno de los días y periodo de estancia del turista, el tiempo y presupuesto máximo del turista, entre otros datos propios de la región turística.

3. MÉTODO

3.1 Área de estudio

Colombia presenta diferentes regiones con potenciales turísticas, entre estas, el Departamento de Sucre. Estas regiones deben ser fortalecidas para poder hacer frente a los cambios mundiales que se generan en el turismo durante la pandemia. Sin embargo, antes del Covid-19 ya existían diferentes problemas de competitividad en varias regiones. Sucre se encuentra ubicado al norte de Colombia y está conformado por cinco subregiones (Golfo de Morrosquillo, Sabanas, Montes de María, La Mojana y San Jorge), cada una con diferentes economías, culturas, ecosistemas, contextos históricos, los cuales potencian la presencia de diferentes tipos de turismo (Figura 1).



Figura 1. Mapa de Colombia y localización del Departamento de Sucre

3.2 Metodología

El proceso de investigación se realiza en dos fases correspondientes al análisis de la cadena de turismo en Sucre y la construcción de bases de datos para el desarrollo de modelos matemáticos de planificación turística. El estudio de la cadena de turismo parte de la identificación de los actores y eslabones de la cadena, y el suministro de información secundaria mediante el uso de bases de datos gubernamentales y documentos sectoriales. El análisis de la información se consolida con base a las subregiones del departamento; para el análisis de los POIs, se toma como base los sitios turísticos pertenecientes al corredor turístico del Golfo de Morrosquillo y la Sabana [31].

La construcción de las bases de datos se realiza acorde con la división por subregiones, municipios, tipos de turismo y la ruta general. Con ello, se obtienen un conjunto de diversas instancias que presentan datos de matrices de tiempos y distancia de viaje para dos modos de transporte, puntuación de cada POIs evaluado según el documento del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo [32], tiempo de apertura y cierre de POIs y costos promedios asociados al transporte.

4. RESULTADOS

4.1 Diagnóstico del turismo en Sucre

El turismo puede presentar diversas rutas y productos turísticos. Estas rutas que pueden denominarse itinerarios, caminos, corredores, entre otros, son un conjunto de atracciones, experiencias y/o actividades que promueven la interrelación de diversos actores para estimular el desarrollo económico. A su vez, estas rutas constituyen un producto para promover un espacio concreto dentro de un territorio [33].

La ley 300 de 1996 de Colombia estipuló una división de turismo por actividades, considerando la siguiente tipología: ecoturismo, etnoturismo, agroturismo, acuaturismo, turismo metropolitano, y turismo de interés social. Sin embargo, otros autores como [34] proponen una división diferente en la que se encuentra: turismo rural, cultural, de salud, de negocios, solidarios, de aventura y virtual [35]. En Sucre, se identifican actividades turísticas asociadas a sol y playa, turismo de aventura, acuaturismo, turismo religioso, turismo de naturaleza, ecoturismo, turismo gastronómico, cultural y agroturismo [36]. La cadena de suministro para el turismo en Sucre presenta eslabones de proveedores primarios, proveedores secundarios, agentes de viajes, operadores turísticos y finalmente, el turista. Sin embargo, existe un alto índice de informalidad.

4.1.1 Proveedores primarios

Los principales proveedores primarios del turismo en Sucre se encargan de actividades de alojamiento, alimentación, transporte y atracciones. El alojamiento es visto comúnmente como una red de organizaciones dedicadas a diferentes actividades de hospitalidad que incluyen el suministro de productos y/o servicios [37]. Acorde con [38], estas organizaciones en el marco del turismo corresponden a los bienes e inmuebles donde se presta el servicio de hospedaje y se dividen en tres categorías: 1) establecimientos de alojamiento turístico (hoteles, centros vacacionales, hostales y campamentos, y otros establecimientos de comercio que mantengan una oferta habitual), 2) vivienda turística (incluye fincas y apartamentos), y 3) otros tipos de hospedaje turístico no permanente [39].

En 2020 se registraron un total 1.176 establecimientos de alojamiento, de los cuales el 83,7% corresponde a la categoría 1, el 1,6% a la categoría 2, y el 14,7% a la categoría 3. De igual modo, se reportan un total de 7.204 habitaciones y 17.026 camas [40]. El nivel de ocupación hotelera en 2019 fue del 56,96%, sin embargo, en 2020 cayó al 7,9% [41]. La distribución por subregión se muestra en la siguiente Figura 2.

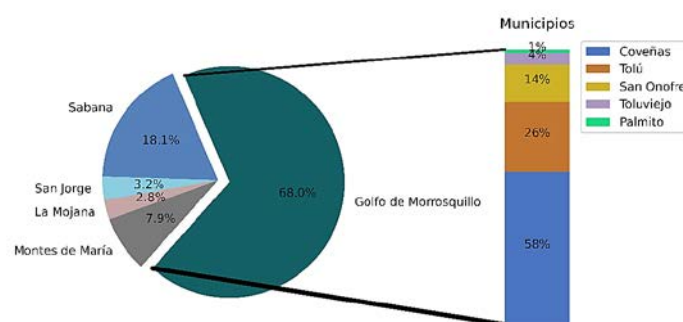


Figura 2. Porcentaje de alojamientos por subregión de Sucre

En cuando a los proveedores de alimentos (comidas y bebidas), existen a 2020 un total de 1.633 establecimientos categorizados en: i. restaurantes o expendios a la mesa de comidas preparadas, ii. otros tipos de expendio de comidas preparadas, iii. restaurantes o expendios de comidas preparadas en cafeterías, iv. elaboración de comidas y platos preparados, y finalmente, v. actividades de otros servicios de comidas y expendio por autoservicio de comidas preparadas [40]. En la Figura 3 se observa la distribución por subregión.

El transporte es otro servicio de gran importancia para el desarrollo turístico, incluso, puede determinar el grado de atracción de un POI [42]. En Sucre se encuentran registrados a 2020 un total de 428 organizaciones

que ofrecen el servicio de transporte de carga y pasajeros en las diferentes modalidades. El transporte de pasajeros de modo terrestre representa el 28,5%, el fluvial 1,2%, marítimo 9,1%, mixto 4,4% y aéreo 0,25%. El resto corresponde a transporte de carga en los diferentes modos [39]. La distribución por subregiones se muestra en la Figura 4.

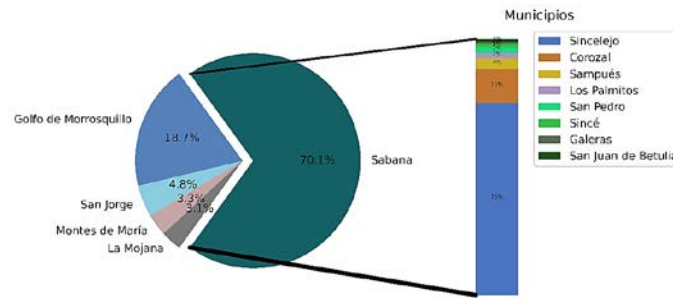


Figura 3. Porcentaje de establecimientos de alimentos por subregión de Sucre

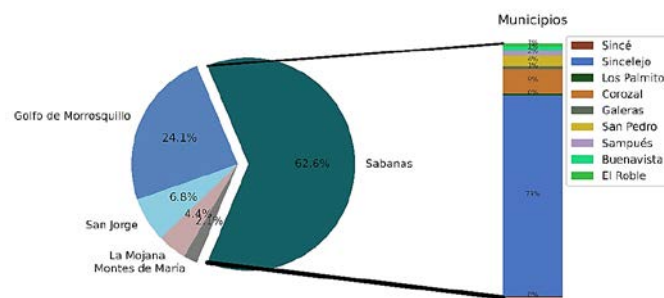


Figura 4. Porcentaje de empresas de transporte por subregión de Sucre

La identificación de los POIs se realiza para las subregiones de Golfo de Morrosquillo y Sabanas, las cuales acumulan más del 86% de los servicios asociados al turismo. En el corredor turístico del Golfo y Sabanas (incluido un municipio del San Jorge), se encuentran un total de 200 POIs asociados a acuaturismo, turismo de aventura, naturaleza y ecoturismo, turismo de sol y playa, turismo cultural y turismo religioso [31]. En la Figura 5a se detona el porcentaje de cada tipo de turismo. En la Figura 5b se observa la participación por municipios y subregión.

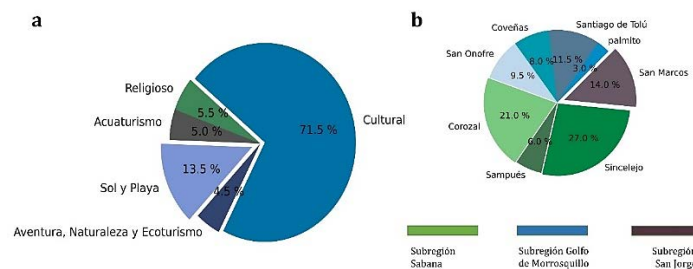


Figura 5. a. Porcentaje de POIs por tipo. b. Porcentaje de POIs por municipios

4.1.2 Proveedores secundarios

En Sucre los proveedores secundarios principales se relacionan con el suministro de servicios de gas, agua, electricidad y recolección de residuos. Existen dos empresas encargadas del suministro combustibles gaseosos por tuberías. De igual modo, existen cuatro empresas dedicadas al comercio al por mayor de combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y productos conexos. En cuanto a la energía eléctrica, se reportan un total de 10 empresas dedicadas a la generación, comercialización y distribución de energía eléctrica. La mayoría de estas empresas (4) se ubican en Sincé y el remanente en los municipios de Corozal, San Benito Abad, San Onofre, Santiago de Tolú y Toluvié.

El servicio de tratamiento y distribución de agua potable en es realizado por las empresas de servicio público de acueducto y alcantarillado que tiene cada municipio. Existen otras empresas dedicadas al

embotellamiento y distribución de agua potable ubicadas principalmente en la subregión de la Sabana. En total se reportan 46 empresas dedicadas a este rubro. Finalmente, para el manejo de los residuos orgánicos, residuos ordinarios aprovechables (Vidrio, Plástico, Papel y Cartón) y manejo especial (equipos electrónicos, periféricos, luminarias y tonners) se tiene como autoridad ambiental a la Corporación Autónoma Regional de Sucre CARSUCRE. Esta entidad se encarga de la vigilancia, la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales en las subregiones de la Sabana, Montes de María y Golfo de Morrosquillo. Para el San Jorge y La Mojana, la entidad ambiental encargada es la Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge CORPOMOJANA.

4.1.3 Operadores turísticos

En Sucre, los operadores turísticos son un eslabón de gran relevancia para el turismo. Estos actores son gestores y dinamizadores de productos y servicios de rutas turísticas rurales y regionales [43]. Según la Cámara de Comercio de Sincelejo, hasta el año 2020 se registran 14 establecimientos que ofrecen este tipo de servicio, ubicados en las subregiones de Sabanas y Golfo de Morrosquillo [40] (Figura 6).

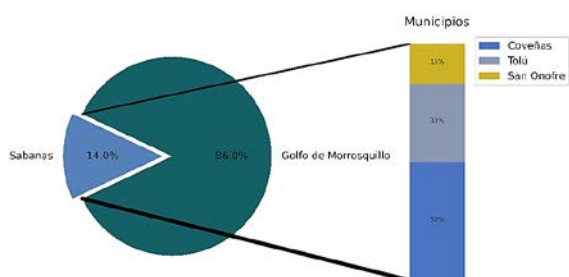


Figura 6. Porcentaje de operadores turísticos por subregión de Sucre

4.1.4 Agencias de viaje

Las agencias de viaje son canales minoristas de comercialización y promoción de los productos turísticos [44]. Para el año 2020, se registraron 51 organizaciones ubicadas en tres subregiones (Sabana, Golfo de Morrosquillo y San Jorge) [40]. La distribución porcentual se muestra en la Figura 7.

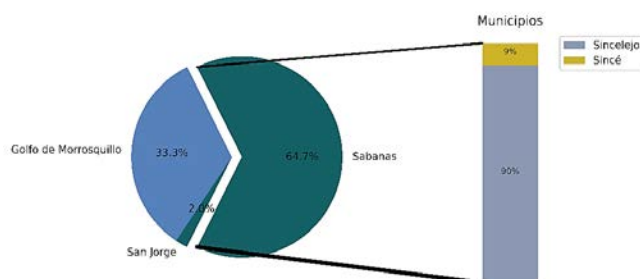


Figura 7. Porcentaje de agencias de viaje por subregión de Sucre

4.1.5 Turistas

En Sucre arriban turistas residenciales y no residenciales. El reporte de arribos de turistas no residenciales extranjeros mostraba una tendencia de crecimiento constante al igual que las cifras nacionales y mundiales. El número de turistas reportados en 2019 alcanzó un total de 1.496, sin embargo, en 2020 se reportó solo un total de 463 [9].

Adicionalmente, según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE, el total de visitantes internos con destino a Sucre en 2019 que pernoctaron por lo menos una noche fue aproximadamente de 43.800, sumado a 28.000 que no pernoctaron [41, 45]. Estas cifras generalmente se comportan según las temporalidades (i.e., existen meses de mayor flujo como lo son noviembre, diciembre, enero y junio) [46].

4.2 Construcción de instancias de Sucre

Existe un alto grado de importancia sobre el desarrollo de modelos de optimización en las decisiones operativas del turismo enfocadas a la planificación turística [19]. Por lo cual, un conjunto de instancias reales fue construido como bases de datos de entrada para modelos cuantitativos. Las instancias se crearon acorde al tipo de turismo, subregiones (Golfo de Morrosquillo y Sabanas), municipios y ruta general. En total se desarrollaron 16 instancias como se muestra en la Tabla 1. Las instancias se establecen desde el enfoque del Team Orienteering Problem with Time Windows TOPTW el cual es una variante del del TOP. El TOPTW implica la construcción de diferentes rutas en una misma planificación considerando que en cada atractivo turístico pueden existir horarios de atención o de apertura y cierre (e.g., museos) [30].

Tabla 1. Instancias construidas

Instancias	Cantidad	Tipos	Vértices-/	Modos de transporte-/
Toptw-jClass	5	a= acuaturismo	a=11	a, b, c, d, e, y f = 2
		b= aventura, naturaleza o ecoturismo	b=10	
		c=cultural	c=144	
		d= religioso	d=12	
		e= sol y playa	e=27	
Toptw-jSubR	2	a=Golfo	a=65	a y b = 2
		b=Sabanas	b= 137	
Toptw-jMun	8	a= Corozal	a=44	a, b, c, d, e, f, g, y h= 2
		b=Coveñas	b= 18	
		c=Palmito	c= 7	
		d=Sampués	d= 14	
		e= San-Marcos	e=29	
		f= San-Onofre	f=18	
g=Santiago-de-Tolú	g= 24			
h=Sincelejo	h=59			
Toptw-jGen	1		201	2

Cada instancia contiene los siguientes parámetros: ubicación geográfica de los POIs, matriz de distancia, modos de transporte (carro y bus) y velocidades promedio, ventanas de tiempo, puntuación de cada POI, tiempo y presupuesto máximos. Las instancias pueden ser consultadas en <http://jrmontoya.wordpress.com/research/Instances>

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las subregiones que generan mayor aporte de ofertas del turismo en cada eslabón de la cadena son Sabana y Golfo de Morrosquillo, debido al gran potencial de turismo de sol y playa en los municipios de Coveñas, Santiago de Tolú y San Onofre, pertenecientes al Golfo. Asimismo, a que la mayoría de los intermediarios turísticos (agentes y operadores) se encuentran en Sincelejo, ubicada en la Sabana. En cuanto a servicios de alojamiento, Coveñas y Santiago de Tolú son los municipios con mayor número de establecimientos dedicados a este rubro (57,27%). Por otra parte, en Sincelejo se ubican la mayoría de los establecimientos de comidas y bebidas, y los servicios de transporte (52,6% y 47,89%, respectivamente).

En cuanto a los POIs, a pesar de que la gran mayoría se enmarcan en el turismo cultural, la principal tendencia de Sucre es hacia el turismo de sol y playa. Este atractivo genera movilización de turistas residenciales y no residenciales. Sin embargo, hace falta potenciar la competitividad turística del departamento e impulsar el desarrollo de los demás tipos de turismo asociados a la naturaleza (acuaturismo, ecoturismo, turismo de aventura y turismo de naturaleza). Sucre presenta diversas áreas naturales con potencial turístico, sin embargo, este proceso debe realizarse con base al cuidado y conservación del ambiente debidamente ejecutado en la práctica para evitar impactos negativos [47].

La división realizada para la construcción de las instancias permite desarrollar modelos y resolverlos con métodos exactos y aproximados debido al tamaño. A mayor tamaño de las instancias (medianas y grandes) se requiere el uso de algoritmos de solución como heurísticas y metaheurísticas para solucionar el TTDP. Sin embargo, con las pequeñas se pueden aplicar métodos exactos, incluso usar software de optimización como GAMS, GUSEK, LINDO, entre otros.

6. CONCLUSIONES

El turismo es uno de los sectores de mayor aporte a la economía y el más impactado de manera negativa por la pandemia del Covid-19. Por lo cual, se requieren medidas que permitan recuperar el turismo y generar reactivación económica. Para esto, es necesario conocer las potencialidades y la oferta de valor con que cuentan las zonas turísticas y posteriormente, desarrollar estrategias de gestión mediadas por herramientas de toma de decisiones. En este sentido, en esta investigación se realizó la caracterización de la cadena de turismo del departamento de Sucre, Colombia. Se analizó de manera descriptiva la oferta en los eslabones de la cadena, en donde se observa que las subregiones de Golfo de Morrosquillo y Sabanas son las más importantes en materia turística, soportada por el turismo de sol y playa como principal turismo de Sucre.

Dentro del uso de herramientas para la toma de decisión, la investigación operativa a través de la modelación matemática sugiere un enfoque que permite el desarrollo de modelos eficientes que facilitan la gestión turística. Sin embargo, es necesario organizar las bases de datos como parámetros de entrada para poder evaluar este tipo de modelos. Por lo cual, se construyeron 14 instancias de tamaño pequeño, mediano y grande, agrupadas por subregiones, tipos de turismo y municipios, como base de insumo para la planificación del turismo en Sucre a través del TTD modelado como TOPTW. Para investigaciones futuras se propone el desarrollo de los modelos matemáticos aplicados a los casos reales como el turismo en Sucre. Adicionalmente, se deben desarrollar algoritmos de solución debido a la complejidad computacional de este tipo de modelos.

Agradecimientos

Este trabajo es parcialmente financiado por la Convocatoria 009 de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (2021/00041/001 Ref.: PS2320202), la Beca de Doctorado *Carlos Jordana* de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana (proyecto INGPhD-37-2020) y por una beca del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia.

REFERENCIAS

- [1] M. Nicola *et al.*, "The Socio-Economic Implications of the Coronavirus and Covid-19 Pandemic: A Review," *Int. J. Surg.*, vol. 78, no. April, pp. 185–193, 2020.
- [2] UNWTO, *International Tourism Highlights, 2019 Edition*. Madrid, 2019.
- [3] UNWTO, *UNWTO Tourism Highlights. International Tourism Trends 2017*. 2018.
- [4] UNWTO, *UNWTO Tourism Highlights. International Tourism Trends 2016*. 2017.
- [5] UNWTO, "World Tourism Barometer," 2020.
- [6] N. Donthu and A. Gustafsson, "Effects of Covid-19 on business and research," *J. Bus. Res.*, vol. 117, no. June, pp. 284–289, 2020.
- [7] W. Kanda y P. Kivimaa, "What opportunities could the Covid-19 outbreak offer for sustainability transitions research on electricity and mobility?," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 68, no. May, p. 101666, 2020.
- [8] M. H. Shakil, Z. H. Munim, M. Tasnia y S. Sarowar, "Covid-19 and the environment: A critical review and research agenda," *Sci. Total Environ.*, vol. 745, p. 141022, 2020.
- [9] Centro de Información Turística de Colombia - CITUR, "Llegada de visitantes extranjeros no residentes por modo aéreo, terrestre y marítimo," 2021.
- [10] F. Higgins-Desbiolles, "Socialising tourism for social and ecological justice after Covid-19," *Tour. Geogr.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–14, 2020.
- [11] G. Bertella, "Re-thinking sustainability and food in tourism," *Ann. Tour. Res.*, no. July, p. 103005, 2020.
- [12] Centro de Pensamiento Turístico de Colombia, "Índice de Competitividad Turística Regional de Colombia - ICTRC 2018.," 2018.
- [13] D. Y. Yeh y C. H. Cheng, "Recommendation system for popular tourist attractions in Taiwan using Delphi panel and repertory grid techniques," *Tour. Manag.*, vol. 46, pp. 164–176, 2015.
- [14] P. Vansteenwegen and D. Van Oudheusden, "The Mobile Tourist Guide: An OR Opportunity," *OR Insight*, vol. 20, no. 3, pp. 21–27, Jul. 2007.
- [15] A. Gunawan, H. C. Lau y P. Vansteenwegen, "Orienteering Problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 255, no. 2, pp. 315–332, Dec. 2016.
- [16] S. Boon-itt, C. Y. Wong y C. W. Y. Wong, "Service supply chain management process capabilities: Measurement development," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 193, no. May 2016, pp. 1–11, 2017.

- [17] R. S. Sullivan, "The service sector: Challenges and imperatives for research in operations management," *J. Oper. Manag.*, vol. 2, no. 4, pp. 211–214, 1982.
- [18] S. J. Page, *Tourism Management: An introduction*, Fourth Edi. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [19] X. Zhang, H. Song y G. Q. Huang, "Tourism supply chain management: A new research agenda," *Tour. Manag.*, vol. 30, no. 3, pp. 345–358, 2009.
- [20] T. K. Hong y S. Zailani, "Service supply chain practices from the perspective of Malaysian tourism industry," *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, no. February, pp. 539–543, 2011.
- [21] H. K. Lee y Y. Fernando, "The antecedents and outcomes of the medical tourism supply chain," *Tour. Manag.*, vol. 46, pp. 148–157, 2015.
- [22] D. Szpilko, "Tourism Supply Chain-Overview of Selected Literature," *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 687–693, 2017.
- [23] H. Peng, X. Xu y W. Chen, "Tourism supply chain coordination by Tourism Websites," in *2011 International Conference on Management and Service Science*, 2011, pp. 1–4.
- [24] F. Ahmadimanesh, M. M. Paydar y E. Asadi-Gangraj, "Designing a mathematical model for dental tourism supply chain," *Tour. Manag.*, vol. 75, no. May, pp. 404–417, 2019.
- [25] S. Ammirato, A. M. Felicetti y M. Della Gala, "Tourism destination management: A collaborative approach," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 434, pp. 217–226, 2014.
- [26] M. Sigala, "A supply chain management approach for investigating the role of tour operators on sustainable tourism: the case of TUI," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 15, pp. 1589–1599, 2008.
- [27] M. Albert da Silva, R. A. Costa y A. C. Moreira, "The influence of travel agents and tour operators' perspectives on a tourism destination. The case of Portuguese intermediaries on Brazil's image," *J. Hosp. Tour. Manag.*, vol. 34, pp. 93–104, 2018.
- [28] B. McKercher, T. Packer, M. K. Yau y P. Lam, "Travel agents as facilitators or inhibitors of travel: Perceptions of people with disabilities," *Tour. Manag.*, vol. 24, no. 4, pp. 465–474, 2003.
- [29] Z. Liao y W. Zheng, "Using a heuristic algorithm to design a personalized day tour route in a time-dependent stochastic environment," *Tour. Manag.*, vol. 68, pp. 284–300, 2018.
- [30] I. Chao, B. L. Golden y E. A. Wasil, "The team orienteering problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 88, pp. 464–474, 1996.
- [31] Viceministerio de Turismo, "Listado de atractivos turísticos de Sucre," Sincelejo, Sucre, 2020.
- [32] Ministerio de Comercio Industria y Turismo, "Metodología para la elaboración del inventario de atractivos turísticos," *Mincit*. Bogotá, p. 28, 2010.
- [33] T. J. López-Guzmán y S. M. Sánchez Cañizares, "La creación de productos turísticos utilizando rutas enológicas," *PASOS Rev. Tur. y Patrim. Cult.*, vol. 6, no. 2, pp. 159–171, 2008.
- [34] J. Rodríguez y M. Alonso, *Nuevas tendencias y retos en el sector turismo: Un enfoque multidisciplinar.*, Editorial. Universidad Autónoma de Madrid. Fundación General, 2009.
- [35] G. F. Benavides, "Las políticas públicas del turismo receptivo colombiano," *Suma Negocios*, vol. 6, no. 13, pp. 66–73, 2015.
- [36] Gobernación de Sucre; Fondo de Promoción Turística - Colombia, "Plan estratégico de desarrollo turístico de Sucre 2011-2020. Documento ejecutivo." Sincelejo, Sucre, pp. 1–55, 2011.
- [37] X. Xu y D. Gursoy, "Influence of sustainable hospitality supply chain management on customers' attitudes and behaviors," *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 49, pp. 105–116, 2015.
- [38] *Ley 1101 de 2006, de 22 de noviembre, por la cual se modifica la Ley 300 de 1996 - Ley General de Turismo y se dictan otras disposiciones.* 2006, pp. 1–5.
- [39] Ministerio de Comercio Industria y Turismo, *Decreto 2119, 15 de noviembre de 2018, por medio del cual se reglamenta la prestación del servicio de alojamiento turístico y se modifican la Sección 12 del Capítulo 4 del Título 4 de la Parte 2 del Libro 2 y el párrafo del artículo 2.2.4.7.2. del Decre.* 2018, pp. 1–3.
- [40] Cámara de Comercio de Sincelejo, "Listado de agencias de viaje y operadores turísticos de Sucre," Sincelejo, 2021.
- [41] DANE, "Boletín técnico. Muestra mensual de hoteles (MMH). Mayo de 2020," Bogotá D.C., 2020.
- [42] D. T. Le-Klähn y C. M. Hall, "Tourist use of public transport at destinations – a review," *Curr. Issues Tour.*, vol. 18, no. 8, pp. 785–803, 2015.
- [43] S. Garry y R. Martínez, "Fortalecimiento de la cadena de turismo en el Departamento de La Libertad, El Salvador," Ciudad de México, 2016.
- [44] A. Calveras y F. Orfila, "Un análisis económico de la intermediación en el sector turístico," *Cuad. Econ.*, vol. 33, no. 91, pp. 67–94, 2010.
- [45] Ministerio de Comercio Industria y Turismo, "Perfiles Económicos Departamentales. Perfil económico: departamento de Sucre.," Bogotá D.C., 2020.
- [46] E. Ruiz-Carta y A. Vergara-Narváez, "Condiciones de demanda turística en una ruta ecoturística en el corredor Coveñas-Tolú en el departamento de Sucre," *CITAS Ciencia, Innovación, Tecnol. Ambient. y Soc.*, vol. 3, no. 1, pp. 149–157, 2017.
- [47] L. Ren, J. Li, C. Li y P. Dang, "Can ecotourism contribute to ecosystem? Evidence from local residents' ecological behaviors," *Sci. Total Environ.*, vol. 757, p. 143814, 2021.

Mejoramiento de la calidad administrativa mediante una estrategia de articulación del plan de gobierno local con la norma GTC -ISO 18091:2019

Hernando Camacho Camacho¹

Sara Inés Castaño García²

Sandra Patricia López Zabala³

Cindy Julieth Moscoso Casallas⁴

Universidad Santo Tomás

Colombia

La calidad del gobierno local hace parte de la garantía de un plan de desarrollo dentro de un territorio específico. Por ese motivo y dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, se ha convertido en una necesidad abordar la gestión de calidad de los gobiernos locales, en especial en aquellos municipios donde está ausente un sistema de calidad de gestión, como en el caso de Lenguazaque y Fúquene, en Colombia. Por lo tanto, la presente investigación, mediante una metodología cualitativa, busca articular estratégicamente la norma GTC-ISO 18091:2019 con el plan de gobierno local de estos municipios, con el propósito de mejorar la calidad administrativa y lograr un alto desarrollo de confiabilidad de los ciudadanos hacia sus líderes regionales, en pro del logro estratégico de los indicadores propuestos en la Agenda 2030 sobre desarrollo sostenible. Aplicando, la Herramienta de evaluación del gobierno local de la norma GTC-ISO 18091:2019, mediante una metodología de gestión 5W2H, identificando ocho indicadores ausentes para Lenguazaque y dos indicadores ausentes para Fúquene, de los 39 indicadores de gestión de política pública. Logrando una articulación estratégica entre los indicadores de la norma con los planes de gobierno locales de las respectivas alcaldías.

¹ Ingeniero Metalúrgico, Especialista en Administración de empresas y Magíster en docencia e investigación con énfasis en ingeniería.
Contacto: hernandocamacho@usantotomas.edu.co

² Ingeniero Ambiental, Especialista en Higiene, Seguridad y Salud en Trabajo y Magíster en Calidad y Gestión Integral.
Contacto: saracastano@usantotomas.edu.co

³ Profesional en Salud Ocupacional, Especialista en Gerencia de Riesgos Laborales y Magíster en Calidad y Gestión Integral.
Contacto: sandra.lopezz@usantotomas.edu.co

⁴ Ingeniero de Alimentos y Magister en Calidad y Gestión Integral.
Contacto: cindymoscoso@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad es cada vez más cambiante, de tal manera que se ha convertido en un compromiso de todos velar por el desarrollo de una sociedad sostenible. Para tal fin, la Organización de las Naciones Unidas ONU ha formulado 17 objetivos, denominados los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, con 169 metas que le apunta a fortalecer la paz y la prosperidad a lo largo de todo el planeta [1].

Dentro del marco de los ODS [2] surge la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, documento que busca el logro de los ODS a nivel territorial y local. Sin embargo, para su aplicación y debido seguimiento se hace cada vez más evidente la necesidad de comprender la relación existente entre gestión de calidad pública y gobernanza, lo cual permite garantizar el desarrollo de un proceso eficaz y eficiente que atienda las necesidades de la población de forma oportuna, fortaleciendo el proceso de gobernabilidad local, donde la gestión de calidad al ser un proceso cíclico asegura el desarrollo operativo y administrativo del municipio de forma eficaz y objetiva.

Es por ello, que se requiere la aplicación óptima y objetiva de la norma GTC- ISO 18091: 2019 [3], la cual se establecerá como una ruta y herramienta evaluativa que permitirá lograr un crecimiento social y humano, sin vulnerar los recursos de las generaciones próximas, dando lugar a un modelo de desarrollo sostenible con base a los ODS. De esta manera la norma se constituye como una serie de pautas enfocadas a desarrollar un sistema de calidad del gobierno local. Básicamente, esta norma es una:

Herramienta que le permite a los gobiernos locales, encontrar la ruta más rápida y óptima para proveer de servicios integrales y de calidad a sus ciudadanos; (...) con el fin de establecer las bases para construir gobiernos sostenibles, confiables y resilientes. La ISO 18091 (...) es el primer estándar internacional sobre calidad en gobiernos, (...) y en la nueva versión -2019- establece los nuevos elementos que será el referente mundial para medir los 17 ODS en los municipios y su implementación integral tal como sugiere ISO [4].

La implementación de esta norma con estándares internacionales facilita y promueve el desarrollo y funcionamiento de un gobierno local comprometido, transparente, confiable y articulado con los ODS. Permitiéndole responder adecuadamente a las necesidades de la población en pro al desarrollo de una sociedad sostenible, equitativa y estable. Donde, las alcaldías municipales con la firme convicción de garantizar su buena gestión y buscar la confiabilidad de los ciudadanos. Cada vez, consideran más preponderante y significativa la implementación y articulación de los planes de gobierno local con la GTC-ISO 18091: 2019, como sistema de calidad de gestión local.

Bajo el marco de 7 principios de calidad, establecidos en la norma ISO 9001 citado en [5] para el gobierno local. Los cuales, son: *Enfoque al ciudadano*: el gobierno local debe centrarse en el servicio de sus ciudadanos, entonces las necesidades y expectativas de ellos deberían ser prioritarios; *Liderazgo*: la alta dirección del gobierno local deberá proyectar y diseñar una visión para su región; *Compromiso a las personas*: los procesos del gobierno local son una responsabilidad compartida; *Enfoque a procesos*: toda actividad, proceso o plan que tenga el gobierno local debe estar enfocando en el proceso y su efectividad; *Mejora*: los gobiernos locales deben apuntarle a nuevas oportunidades de crecimiento y desempeño; *Toma de decisiones basadas en la evidencia*: toda información estadística y descriptiva deberá ser base para crear y mejorar el sistema de gestión de la calidad y sus procesos; y *Gestión de las relaciones*: el gobierno local deberá prestar atención y crear canales para fortalecer la relación y comunicación con los ciudadanos.

Principios con los cuales, se logrará mejorar la administración local y el contexto socioeconómico, político, ambiental y humano de la región. Tal como, se ha evidenciado en algunas ciudades de México. Donde, se ha implementado la norma ISO 18091:2019 en su versión anterior. Tal es el caso de Guadalajara, México, que logró optimizar su funcionamiento administrativo, su transparencia en gestión y comunicación con la ciudadanía, y aportó significativamente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, aportando al alcance de las metas establecidas por los ODS.

Otro caso para destacar es la articulación de esta norma con el plan de gobierno del municipio de Boca de Río, México, que a lo largo de los últimos años ha implementado la norma para la evaluación y generación,

de una alta calidad en el gobierno local. Aumentando, su confiabilidad y credibilidad con los ciudadanos entorno a su administración local. Logrando el cumplimiento pleno de los 362 subindicadores de la Agenda 2030, documento centralizado en la aplicación de los ODS dentro de alcaldías y gobiernos locales [6].

Sin embargo, a nivel local en Colombia [7] por mucho tiempo no ha existido una articulación o aplicación de las normas GTC- ISO 18091:2019 con los Planes de Gobierno Local. Limitando el conocimiento, eficacia, transparencia, competitividad y confiabilidad de la comunidad en sus gobernantes locales. Haciéndose evidente la necesidad de formular una estrategia que permita articular la norma con los planes de gobierno locales. Para tal fin, se analizarán dos escenarios de estudio, bajo el modelo de una investigación de carácter cualitativa con un alcance de tipo descriptivo, mediante una metodología de gestión 5W2H.

El primer escenario fue el municipio de Lenguazaque y el segundo el municipio de Fúquene. Ambos se localizan en el departamento de Cundinamarca y se caracterizan por ser regiones agrícolas, ganaderas, turistas, mineras y comerciales. Además, de que ninguna de las dos poblaciones cuenta con la norma GTC-ISO 18091:2019. Por lo cual, se convierten en objeto de estudio, con el propósito de aportar al mejoramiento de la gestión local y establecer una estrategia para la articulación de la norma con los planes de gobierno municipal.

Esta investigación se llevó a cabo mediante 4 fases: exploratoria, diagnóstica, articulación y estratégica. Donde, se realizó un diagnóstico, teniendo en cuenta los 39 indicadores que están contemplados dentro de los 4 cuadrantes establecidos por la GTC-ISO 18091:2019 [3], que corresponden a: Desarrollo Institucional para un buen gobierno, Desarrollo Económico Sostenible, Desarrollo Social incluyente y Desarrollo Ambiental Sostenible.

Teniendo un proceso evaluativo en tres niveles establecidos: rojo (baja confiabilidad), amarillo (en proceso estratégico de confiabilidad) y verde (condiciones aceptables de confiabilidad). Permitiendo, conocer el estado actual de los municipios objeto de estudio, siendo el nivel rojo quien requiere atención prioritaria por parte del Gobierno Municipal, ya que las acciones son de prioridad principal, ahora los resultados en amarillo indican que se requiere hacer algunos ajustes para garantizar la confiabilidad de las acciones implementadas y, por último, el color verde evidencia una gestión confiable.

Buscando así que las acciones que se ejecuten en los municipios objeto de estudio sean transparentes y confiables, de tal forma que la comunidad conozca en términos sencillos la gestión de calidad y el estado actual de la ejecución del Plan de Gobierno Local del municipio, cumpliendo los lineamientos del gobierno nacional y los acuerdos internacionales. Aportando, al cumplimiento de los ODS, los cuales se encuentran establecidos a través del CONPES 3918 [8].

Proceso que se lleva a cabo mediante la implementación del Anexo A: Herramienta de evaluación de gobierno local para la gestión integral de calidad, propuesto por la norma GTC-ISO 18091:2019 y la metodología de gestión 5W2H Kaizen [9], siendo un método para analizar problemas, basado en la formulación de 7 preguntas acerca del problema de estudio.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue plantear una propuesta que logre la articulación de la norma GTC- ISO 18091:2019 con el Plan de Gobierno Local de los municipios objeto de estudio. Beneficiando a la comunidad y la administración local hacia el cumplimiento de los ODS. Buscando así, responder la pregunta de investigación: ¿Cómo articular la norma GTC-ISO 18091:2019 con el Plan de Gobierno Local de los municipios de Fúquene y de Lenguazaque, del Departamento de Cundinamarca?

2. MÉTODO

Con la intención de encontrar una estrategia que permitiera la articulación de la norma GTC- ISO 18091: 2019 con el plan de gobierno local del municipio de Lenguazaque y Fúquene en el departamento de Cundinamarca. Se llevó a cabo una investigación cualitativa con un alcance de tipo descriptivo, presentándose un proceso investigativo analítico y detallado.

Donde el modelo de investigación cualitativo es visto como un *proceso en términos descriptivos que interpreta acciones, lenguajes, hechos funcionalmente relevantes y los sitúa en una correlación con el más amplio contexto social* [10]. El cual se *orienta a profundizar casos específicos y no a generalizar. Su preocupación no es prioritariamente medir, sino cualificar y describir el fenómeno social a partir de rasgos determinantes* [11]. Asumiendo procesos como: el planteamiento abierto y contextualizado, análisis de múltiples realidades subjetivas y conjuntas, método inductivo, manejo interpretativo y análisis descriptivo de fenómenos, etc.

Por consiguiente, el carácter cualitativo [12] de la investigación permitió describir el tema y escenario de estudio de forma puntual e inductiva, mediante la aplicación del Anexo A: Herramienta de evaluación de gobierno local para la gestión integral de calidad de la norma GTC-ISO 18091:2019 [3]. Siendo utilizado para la realización de un diagnóstico de cada municipio, como escenarios de estudios, a partir de cuatro ejes temáticos, establecidos por la norma: Desarrollo institucional para el buen gobierno, Desarrollo económico sostenible, Desarrollo social incluyente, y Desarrollo ambiental sostenible. Posteriormente, se aplicó el anexo D sobre ODS de la ONU, facilitando el análisis aplicativo de los ODS en el municipio.

El desarrollo de la investigación en los municipios de Lenguazaque y Fúquene los constituye, como los escenarios de estudio o muestras por conveniencia de los Municipios de la provincia de Ubaté, Cundinamarca, Colombia. Ambos hacen parte de la provincia de Ubaté, ubicada en el departamento de Cundinamarca y son de categoría 6ª debido a tener una población inferior a 15.000 habitantes [13]. Se caracterizan por ser agrícolas, ganaderos, mineros, comerciales y con un amplio contexto ambiental. La población oscilante está entre los 5.617 Hab. (Fúquene) y los 10.268 Hab. (Lenguazaque) [14]. Estos municipios no presentaban aplicación de la norma GTC- ISO 18091:2019. Por lo cual, cumplían con una de las principales características para ser seleccionados como objeto de estudio.

Para el análisis de ellos, se tuvo en cuenta una serie de variables o categorías. En primer lugar, fue necesario conocer el Plan de Gobierno Local, siendo la ruta de gestión a desarrollar por cada mandatario, trazados para el periodo 2020-2024. Mediante una lectura detallada, identificando su relación con los ODS y su desempeño entorno a los indicadores de gestión pública. En segundo lugar, se manejó el Anexo A de la GTC ISO 18091:2019 y sus 4 categorías (A1- Desarrollo Institucional para un Buen Gobierno con 10 indicadores; A2- Desarrollo Económico Sostenible con 8 indicadores; A3- Desarrollo Social Incluyente con 12 indicadores; y A4- Desarrollo Ambiental Sostenible con 9 indicadores) planteadas por la norma GTC-ISO 18091:2019

En tercer lugar, fue necesario tener claro algunos ejes conceptuales [15] como los Niveles de Desempeño (Rojo: practicas inaceptable; Amarillo: practicas semi aceptable; y Verde: practicas aceptables), Criterios de Priorización (Alto: requiere atención inmediata; Medio: requieren atención de mejoramiento: y Bajo: condiciones aceptables), Eje Estratégico (denominación de los cuadrantes principales de cada plan de gobierno municipal), Indicadores (Criterio para la medición de las condiciones operativas de gestión municipal por categoría), Indicador Ausente (Criterio no presente en el autodiagnóstico municipal) e Indicador a Gestionar (Criterio en nivel de práctica inaceptable).

Entre los instrumentos y técnicas de investigación que se aplicaron están las herramientas establecidas por la GTC-ISO 18091:2019 [3], las cuales son: Anexo A: Herramienta de evaluación de gobierno local para la gestión integral de calidad (permitió realizar un diagnóstico y evaluación inicial del gobierno local con base a 39 indicadores de gestión de políticas públicas); y el Anexo D: Relación entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (proporcionó información evaluativa sobre la aplicación de los ODS dentro del plan local del gobierno local).

Finalmente, se usó el método de gestión 5W2H [9] (qué -What-, por qué -Why-, dónde -Where-, cuándo -When-, quién -Who-, cómo -How- y cuánto cuesta -How much-), siendo una herramienta de gestión trascendental, que se puntualizó en la formulación de 7 preguntas, que permitieron abordar el tema de investigación y el plan de gobierno actual de cada escenario de estudio. Para ello, se estructuró una herramienta en Excel (software), donde se manejaban los ejes temáticos o dimensiones del plan de gobierno y las 4 categorías establecidas en el Anexo A de la GTC- ISO 18091:2019.

Con lo cual, se realizó una individualización de la información estratégica de cada plan de gobierno y se identificó su relación con los indicadores establecidos por categoría. Permitiendo, gestionar aquellos indicadores que no estaban presentes en la relación entre el Plan de Gobierno y los indicadores de cada categoría, dando lugar a una articulación entre el Plan de gobierno municipal y la norma GTC- ISO 18091:2019.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se dividieron en tres apartados relacionados. Inicialmente, se partió por una Caracterización Municipal, donde se identificó que el municipio de Fúquene y Lenguazaque son de categoría 6a, y se encuentran localizados en la provincia de Ubaté, dentro del departamento de Cundinamarca, Colombia. Fúquene, cuenta con una superficie de área de 87 km² con 5.617 habitantes. Dentro de su jurisdicción se encuentra la Inspección de Capellanía. Su económica es agrícola, ganadera, actividades turísticas, rutas ecológicas y actividades artesanales. Tiene un alto interés en los temas ecológicos, debido a la presencia de la Laguna de Fúquene, dentro de su área geográfica. Siendo uno de los principales ecosistemas de agua dulce de la región cundiboyacense. Además, cuenta con: dos centros de salud de primer nivel, dos instituciones de educación (media secundaria), planta de tratamiento y potabilización de agua para el área urbana, ausencia de una planta de tratamiento de aguas negras.

El plan de gobierno local para el periodo 2020-2023 [16] se enfocó en 5 ejes temáticos: 1) Garantía de buen gobierno, cuidando el medio ambiente; 2) Fúquene: Tejido Social, garantía de buen gobierno; 3) Competitividad, garantía de buenos gobiernos; 4) Infraestructura con garantía de buen gobierno; y 5) Garantía de buen gobierno, con fortalecimiento institucional. Este plan de gobierno relaciono 5 ejes: social, económico, ambiental, infraestructura e institucional bajo un modelo de transparencia y participación social. Lo cual, le permitió tener una mayor alineación con las categorías e indicadores establecidos en el Anexo A de la norma GTC-ISO 18091:2019.

En contraste, el municipio de Lenguazaque tiene una superficie geográfica de 154 Km², con una población de 10.268 habitantes. Distribuida entre el sector urbano y rural del municipio. Su economía se fundamenta en la minería, agricultura y ganadería. Cuenta con: una topografía y vegetación altamente turística, un centro de salud, dos instituciones educativas oficiales de educación media secundaria y un colegio privado (primaria). El plan de gobierno Lenguazaque 2020-2023 [17] se estructuró en 5 líneas estratégicas: 1) Infraestructura estratégica y servicios públicos para el desarrollo y bienestar colectivo; 2) Calidad de vida y bienestar social; 3) Crecimiento económico para la productividad y el bienestar ambiental; 4) Construyendo buen gobierno y fortalecimiento institucional; y 5) Construyendo confianza para un bienestar en convivencia y seguridad ciudadana. Debido a su estructura, fue más compleja su alineación con las categorías e indicadores definidos por el Anexo A de la norma GTC-ISO 18091:2019 [3].

Una vez obtenido los resultados de cada caracterización se entró al desarrollo del Diagnóstico de la gestión de calidad GTC-ISO 18091:2019 [18] mediante la aplicación del Anexo A: Herramienta de Evaluación del Gobierno Local para la Gestión Integral de la Calidad. Para el proceso de recopilación de información, se contó con el apoyo del personal administrativo de cada alcaldía mediante el jefe de control interno (persona designada por el alcalde para establecer la interrelación entre el equipo investigador y la alcaldía). Una vez, aplicada dicha herramienta se identificó que: el Municipio de Fúquene dentro de la categoría A1- Desarrollo institucional para un buen gobierno, tal como se señala en la Tabla 1, no presentó ningún indicador en color ROJO; dando lugar a dos indicadores en nivel AMARILLO, que fueron valorados por debajo del nivel de prácticas aceptables, porque no tiene procedimientos definidos para la participación ciudadana ni tiene establecido una estrategia para la recuperación de los efectos de una amenaza; y se presentaron ocho indicadores en nivel VERDE, al poseer prácticas aceptables.

Con respecto a la categoría A2- Desarrollo Económico Sostenible para un buen gobierno, se observó dos indicadores en color ROJO, que evidenció la carencia en materia de supervisión en los sistemas de los programas de alimentación y la ausencia de un sistema de transporte que mejoró la accesibilidad al centro del municipio. También se observó un solo indicador en color AMARILLO y 5 indicadores que fueron valorados con niveles de prácticas aceptables color VERDE, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Resultados de la categoría A1- Desarrollo Institucional del municipio de Fúquene [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Gestión integral de la calidad			X
2. Asociación y colaboración comprometida			X
3. Profesionalización de los servidores públicos			X
4. Finanzas públicas y responsabilidad fiscal			X
5. TIC y gestión de datos			X
6. Estado de Derecho y Derechos Humanos			X
7. Transparencia y comunicación			X
8. Participación ciudadana		X	
9. Protección civil y resiliencia		X	
10. Seguridad pública			X

Tabla 2. Resultados de la categoría A2- Desarrollo económico sostenible del municipio de Fúquene [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Innovación y competitividad			X
2. Trabajo decente y crecimiento económico		X	
3. Seguridad alimentaria y hambre cero	X		
4. Formación profesional			X
5. Turismo			X
6. Movilidad	X		
7. Sector Primario			X
8. Industria, comercio y consumo			X

En cuanto a la categoría A3, se evidenció un indicador en nivel ROJO, dado que no se tienen programas para migrantes ni para combatir la discriminación, al igual que no hay recursos ni reglamentación establecida al respecto. En el nivel AMARILLO no se presentó ninguno, y en nivel VERDE se establecieron once indicadores con prácticas aceptables, tal como se señala en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la categoría A3- Desarrollo social incluyente del municipio de Fúquene [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Servicios públicos			X
2. Deportes, recreación y ocio			X
3. Migración e inclusión étnica y social	X		
4. Igualdad de género			X
5. Población vulnerable y personas con discapacidad			X
6. Buena salud y bienestar			X
7. Educación de calidad			X
8. Vivienda digna			X
9. Convivencia pacífica y cultura cívica			X
10. Patrimonio Cultural			X
11. Fin de la pobreza			X
12. Niños, jóvenes y adulto mayor			X

Con la categoría A4 se identificaron 3 indicadores en nivel ROJO, como resultado de: las fuertes cantidades de emisión de gases contaminantes y la ausencia de un programa para el mantenimiento de las fuentes de suministro de agua y manejo de aguas residuales, aunque el municipio empieza a sensibilizar en promoción de proyectos que aporten a la obtención de energías asequibles y limpias. Además, se localizaron 4 indicadores en AMARILLO y 2 indicadores en un nivel VERDE, tal como se relaciona en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la categoría A4- Desarrollo ambiental sostenible del municipio de Fúquene [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Calidad del aire	X		
2. Residuos sólidos		X	
3. Imagen del entorno y atractividad			X
4. Recursos naturales, biodiversidad y ecosistemas		X	
5. Planificación urbana y desarrollo		X	
6. Agua limpia, saneamiento y aguas residuales	X		
7. Protección del suelo		X	
8. Energía asequible y limpia	X		
9. Acciones para el cambio climático y educación ambiental			X

Una vez especificados estos resultados por el municipio de Fúquene se estableció una afinidad con el Anexo D: Relación entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y otros sistemas de medición y gestión con este documento, planteado por la norma GTC-ISO 18091:2019. Donde se tuvo en cuenta los 5 ejes estratégicos del plan de gobierno del municipio de Fúquene y su relación con los ODS, y demás resultados obtenidos en el Anexo A, lo cual permitió evidenciar las siguientes relaciones: En el Eje estratégico: Garantía de un buen Gobierno se asoció con cinco ODS (Agua limpia y saneamiento; Ciudades y comunidades sostenibles; Producción y consumo responsable; Acción por el clima; Vida de ecosistemas terrestres), en el eje Fúquene: Tejido social garantía de buen gobierno se relacionó con seis ODS (Fin de la pobreza; Hambre cero; Salud bienestar; Educación de calidad; Igualdad de género; Reducción de las desigualdades).

Con el eje de Competitividad garantía de buen gobierno se encontró vinculación con cuatro ODS (Hambre cero; Industrias, innovación e infraestructura; Ciudades y comunidades sostenibles; Producción y consumo responsable), en cuanto al eje Infraestructura con garantía de buen, se identificó una relación con dos ODS (Fin de la pobreza; Ciudades y comunidades sostenibles) y con el eje Garantía de buen gobierno con fortalecimiento institucional, se observó una asociación con un solo ODS (Paz, justicia e instituciones sólidas).

Ahora, con respecto a los resultados obtenidos en el Municipio de Lenguazaque al aplicar el Anexo A y el Anexo D, en primer lugar, del Anexo A se encontró que en la categoría A1- Desarrollo institucional para un buen gobierno, se encontraron cero indicadores en nivel ROJO, tres indicadores en nivel AMARILLO y siete indicadores en un nivel de práctica aceptable (color VERDE), tal como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la categoría A1- Desarrollo institucional del municipio de Lenguazaque [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Gestión integral de la calidad		X	
2. Asociación y colaboración comprometida		X	
3. Profesionalización de los servidores públicos			X
4. Finanzas públicas y responsabilidad fiscal		X	
5. TIC y gestión de datos			X
6. Estado de Derecho y Derechos Humanos			X
7. Transparencia y comunicación			X
8. Participación ciudadana			X
9. Protección civil y resiliencia			X
10. Seguridad pública			X

En relación con la categoría A2- Desarrollo Económico Sostenible para un buen gobierno, se identificaron tres indicadores con un nivel de color ROJO, en relación con la ausencia de un sistema de supervisión para los programas de alimentación; al no existir un diagnóstico real sobre los niveles de trabajo decente en el municipio y dado que no se tiene un plan con una perspectiva de turismo sostenible que considere el patrimonio cultural y local del municipio. En contraste, se encontraron dos indicadores en un nivel AMARILLO y tres indicadores evaluados con un nivel de prácticas aceptables color VERDE, tal como se expone en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la categoría A2- Desarrollo económico sostenible del municipio de Lenguazaque [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Innovación y competitividad			X
2. Trabajo decente y crecimiento económico			X
3. Seguridad alimentaria y hambre cero	X		
4. Formación profesional	X		
5. Turismo		X	
6. Movilidad		X	
7. Sector Primario			X
8. Industria, comercio y consumo	X		

La categoría A3- Desarrollo social incluyente, se destacó por presentar un indicador en color ROJO clasificándose en un nivel de prácticas inaceptables, como resultado de la carencia de programas de atención, regulación, antidiscriminación y planes presupuestales para el sector migratorio del municipio.

También se presentaron seis indicadores en nivel AMARILLO y cinco indicadores en un nivel VERDE, así como se relacionan en la Tabla 7

Tabla 7. Resultados de la categoría 3A- Desarrollo social incluyente del municipio de Lenguazaque [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Servicios públicos		X	
2. Deportes, recreación y ocio			X
3. Migración e inclusión étnica y social	X		
4. Igualdad de género			X
5. Población vulnerable y personas con discapacidad		X	
6. Buena salud y bienestar			X
7. Educación de calidad			X
8. Vivienda digna		X	
9. Convivencia pacífica y cultura cívica		X	
10. Patrimonio Cultural		X	
11. Fin de la pobreza		X	
12. Niños, jóvenes y adulto mayor			X

En la categoría A4- Desarrollo Ambiental Sostenible, se localizaron seis indicadores con un nivel de desempeño ROJO, siendo la categoría con mayores indicadores en un nivel de prácticas inaceptables de toda la investigación. Entre las principales causas por las cuales se presentó este nivel de desempeño en el municipio de Lenguazaque están: no se tienen acciones para inspecciones de emisiones de contaminantes móviles y fijos; no hay una regulación del crecimiento poblacional. No cuenta con un programa para el mantenimiento de las fuentes de suministro de agua (subterráneas y superficiales), ni se tiene una planta que permita tratar adecuadamente las aguas residuales; no hay presencia de programas para la erosión ni deforestación; el municipio hasta ahora inicia su acercamiento a programas sobre energía asequible y limpia; y finalmente no se han llevado a cabo, acciones para combatir el cambio climático. Adicionalmente, dentro de esta categoría se presentó un indicador en color AMARILLO y cero indicadores en color VERDE, así como se establece en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la categoría 4A- Desarrollo ambiental sostenible del municipio del Lenguazaque [19]

Indicador	Rojo (1)	Amarillo (2)	Verde (3)
1. Calidad del aire	X		
2. Residuos sólidos		X	
3. Imagen del entorno y atractividad		X	
4. Recursos naturales, biodiversidad y ecosistemas		X	
5. Planificación urbana y desarrollo	X		
6. Agua limpia, saneamiento y aguas residuales	X		
7. Protección del suelo	X		
8. Energía asequible y limpia	X		
9. Acciones para el cambio climático y educación ambiental	X		

Partiendo de lo anterior, se estableció una correspondencia con el Anexo D: Relación entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y otros sistemas de medición y gestión con este documento, propuesto por la norma GTC-ISO 18091:2019. Para lo cual, se tuvo en cuenta los 5 ejes estratégicos del plan de gobierno del municipio de Lenguazaque y su relación con los ODS y los resultados obtenidos en el Anexo A, proceso que dio lugar a las siguientes relaciones:

En el eje estratégico de Infraestructura estratégica de servicios públicos para el desarrollo y bienestar colectivo se evidenció una asociación con tres ODS (Agua limpia y saneamiento; Reducción de las desigualdades; Ciudades y comunidades sostenibles), dentro del eje de Calidad de vida y bienestar social se encontró una relación con seis ODS (Fin de la pobreza; Hambre cero; Salud y bienestar; Educación de calidad; Igualdad de género; y Reducción de las desigualdades).

En cuanto, al eje Construyendo crecimiento económico para la productividad y el bienestar ambiental se identificó una relación con seis ODS (Fin de la pobreza; Hambre cero; Trabajo decente y crecimiento económico; Industria, innovación e infraestructura; Producción y consumo responsable; y Acción por el clima), y en el eje Construyendo buen gobierno y fortalecimiento institucional, y Construyendo confianza

para un bienestar en convivencia y seguridad ciudadana se evidenció una relación con dos ODS (Ciudades y comunidades sostenibles; y Paz, justicia e instituciones sólidas).

Una vez obtenidos los resultados de la aplicación del Anexo A en cada municipio y su respectiva relación con los ODS, según el Anexo D de la norma GTC-ISO 18091:2019, se llevó a cabo la Articulación del Plan de Gobierno Local de los municipios de Fúquene y Lenguazaque con la GTC-ISO 18091: 2019 y la metodología de gestión propuesta, denominada 5W2H [9] (estructura de 7 preguntas). Proceso que dio como resultado, el diseño de una herramienta de gestión de calidad estructurada en 10 columnas, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Metodología de gestión 5W2H [19]

APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE GESTIÓN 5W2H										
Fecha creación Del Plan:		27/11/2020	Responsable Ejecución	Alcaldía Municipal	Equipo Investigador			Sara Castaño, Sandra Patricia López, Cindy Moscoso, Hernando Camacho C.		
PROPUESTA PLAN DE ACCIÓN										
Eje estratégico (Dimensión)	Indicador que gestionar (Acción clave)	Priorización	What?: ¿Qué se hará?	Why?: ¿Razón fundamental?	Where?: ¿Dónde?	When?: ¿Cuándo debe hacerse?		Who?: ¿Quién debe hacerlo?	How?: ¿Cómo debe hacerse?	How much?: ¿Cuánto costará?
						Inicio	Fin			

Dónde, se estableció un orden específico para el análisis: eje estratégico (tomado del plan de gobierno local), indicador a gestionar [18] (con base a los 39 indicadores de la norma GTC-ISO 18091:2019), priorización (valoración evaluativa mediante la semaforización -rojo, amarillo, verde- y criterio de prioridad -alto, medio, bajo-), What? (¿Qué se hará?), Why? (¿Razón fundamental?), When? (¿Cuándo debe hacerse), Who? (¿Quién debe hacerlo?), How? (¿Cómo debe hacerse?) y How much? (¿Cuánto costará?). Este instrumento permitió hacer un proceso de gestión de indicadores con la finalidad de nivelar los indicadores ausentes del plan de desarrollo municipal.

Al momento de su aplicación y desarrollo, se pudo plantear que, en el municipio de Fúquene, al contar con cinco ejes estratégicos en el plan de gobierno municipal, cada uno de ellos se relacionaba con las categorías del Anexo A de la norma GTC-ISO 18091:2019, de la siguiente forma: Eje estratégico- Garantía de buen gobierno, cuidando el medio ambiente, se relacionó con la categoría A4 - Desarrollo Ambiental Sostenible. Localizándose dos indicadores AUSENTES, que corresponden a: Calidad del aire; y Energía asequible y limpia. Además, se identificó un indicador evaluado en nivel rojo con prioridad alta. Establecidos así, tres indicadores por GESTIONAR

En cuanto al eje- Fúquene: tejido social, garantía de buen gobierno, se articuló con la categoría A3 - Desarrollo social incluyente, se presentó un indicador en priorización media (color amarillo) correspondiente a Migración e inclusión étnica, siendo el único indicador por GESTIONAR.

Por otro lado, el eje estratégico- Competitividad, garantía de buen gobierno, se relacionó con la categoría A2 - Desarrollo económico sostenible, se priorizaron en alto (nivel rojo) los indicadores Trabajo decente y crecimiento económico, y Seguridad alimentaria y hambre cero. Además, se estableció el indicador de Movilidad (nivel medio-amarillo). Junto con los dos de nivel rojo como indicadores por GESTIONAR.

Con respecto al Eje- Infraestructura con garantía de buen gobierno, se vinculó con las categorías A4 - Desarrollo Ambiental Sostenible, A3 - Desarrollo Social Incluyente y A2 - Desarrollo Económico Sostenible.

Y en el último, Eje estratégico- Garantía de buen gobierno con fortalecimiento institucional, se relacionó con la categoría A1 - Desarrollo Institucional para un Buen Gobierno, donde se priorizó en nivel alto con color rojo el indicador: Participación Ciudadana. Y se estableció en nivel medio (color amarillo) el indicador Protección civil y resiliencia. Dando lugar a dos indicadores por GESTIONAR.

Respecto, al municipio de Lenguazaque se pudo establecer una relación entre los cinco ejes estratégicos del plan de gobierno municipal con las categorías del Anexo A, de la siguiente forma: Eje estratégico-Infraestructura estratégica y servicios públicos para el desarrollo y bienestar colectivo, se vinculó con la categoría A4 - Desarrollo Ambiental Sostenible. Presentó dos indicadores AUSENTES: Calidad del aire y Residuos sólidos. Y en relación con los indicadores en nivel rojo, se estableció como indicadores por GESTIONAR: Calidad del aire; Residuos sólidos; Planificación urbana y desarrollo; Agua limpia, saneamiento y aguas residuales; Protección del suelo; Energía asequible y limpia; y Acciones para el cambio climático y educación ambiental.

En cuanto al eje- Calidad de vida y bienestar social, se relacionó con la categoría A3 - Desarrollo social incluyente y se identificaron dos indicadores AUSENTES: Migración e inclusión étnica y social; e Igualdad de género. Al vincular con el indicador en nivel rojo, se planteó dos indicadores por GESTIONAR: Migración e inclusión étnica y social; e Igualdad de género.

De otra parte, el eje- Construyendo crecimiento económico para la productividad y el bienestar ambiental, se relacionó con dos categorías: A4- Desarrollo Ambiental Sostenible y con la categoría A2 - Desarrollo económico sostenible, la cual presentó dos indicadores AUSENTES: Innovación y competitividad; y Formación profesional. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta dos indicadores con nivel de priorización media. Planteando, cuatro indicadores por GESTIONAR: Innovación y competitividad; Seguridad alimentaria y hambre cero; Formación profesional; e Industria, comercio y consumo.

En cuanto, al Eje- Construyendo buen gobierno y fortalecimiento institucional, y el Eje- Construyendo confianza para un bienestar en convivencia y seguridad ciudadana, se articularon con la categoría A1- Desarrollo Institucional para un Buen Gobierno. Lo que permitió identificar como indicadores AUSENTES: Gestión integral de la calidad; y Finanzas públicas y responsabilidad fiscal. Los cuales, se constituyeron como los indicadores por GESTIONAR.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicabilidad de la GTC-ISO 18091:2019 [3] en los gobiernos locales es una ayuda para una buena gestión pública municipal, y lograr relucir una cualificación de buenas prácticas municipales, es así como desde la aplicabilidad del anexo A de la GTC- ISO 18091:2019 en las alcaldías de Fúquene y Lenguazaque Municipios del Departamento de Cundinamarca, se logró diagnosticar las condiciones operativas e identificar las necesidades de la población, teniendo en cuenta esto, y tomando como paralelo de análisis a [20].

La autora relaciona la perspectiva de los ciudadanos frente a la metodología IWA/ISO-4 [21], y las debilidades que esta presenta en relación a la articulación existente entre algunas políticas públicas y entidades públicas que no logran encajar en los cuadrantes de la metodología IWA/ISO-4 [22], si bien el anexo A GTC- ISO 18091:2019 permite desde las 4 categorías y los 39 indicadores poder diagnosticar las condiciones operativas municipales, igualmente esta versión de la norma busca que se gestionen las necesidades y expectativas de los ciudadanos, desde el mismo análisis que hace la autora frente a que en Colombia se tiene el observatorio ciudadano, a través de las Veedurías ciudadanas se lograr dar la participación, y el seguimiento a la metodología IWA/ISO-4, igual desde la articulación que se propone en el presente proyecto entre el plan de gobierno municipal y la GTC-ISO 18091:2019, aportamos que se gestione la participación y el seguimiento al plan de gobierno municipal de los Municipios objeto de estudio.

La propuesta de articulación desde las perspectivas de análisis de la tesis comparativa deja ver la importancia de la implementación de esta norma y la viabilidad de seguimiento frente a la gestión pública, desde las veedurías ciudadana que son vigilantes de la buena gestión que debe hacerse desde el gobierno local y la articulación que se puede lograr desde los planes de gobiernos y la participación ciudadana a través de las veedurías ciudadanas.

Por consiguiente, la Herramienta de Autodiagnóstico Municipio Fúquene y la Herramienta de Autodiagnóstico Municipio Lenguazaque, junto con la Propuesta de articulación - 5W2H Municipio Fúquene y la Propuesta de articulación - 5W2H Municipio Lenguazaque, aportaron a una gestión eficiente y

transparente, a su vez contribuyó con el Modelo Integrado de Planeación y Gestión (MIPG) [18], aportando a la gestión municipal y al cambio cultura de manera sistemática e innovadora.

Es importante mencionar que la estructura de las dimensiones estratégicas del Plan de Gobierno Municipal por su organización en los programas y subprogramas requirió un análisis más detallado de relación con cada una de las categorías y los indicadores del Anexo A de la GTC-ISO 18091: 2019[3], sin embargo, se logró establecer la articulación haciendo uso de la metodología propuesta en el proyecto

Es evidente que cada vez es más necesario lograr una articulación teoría y práctica entre el plan de gobierno municipal y la norma GTC-ISO 18091: 2019. Por lo cual, es recomendable que el plan de gobierno desde su desarrollo (formulación) este canalizado y articulado con la norma, esto garantizaría una articulación real dentro del contexto práctico, garantizando el desarrollo de un gobierno confiable y pertinente para los ciudadanos y sus necesidades. No obstante, para lograr dicha meta es fundamental el compromiso y corresponsabilidad de todo el personal administrativo y de gestión local.

A su vez, existe un bajo porcentaje de alcaldías municipales que están aplicando dicha norma dentro del funcionamiento local, en gran medida esto puede deberse al desconocimiento en relación con la forma aplicativa de la norma y al desarrollo de sistemas de gestión de calidad publica Por esa, razón se sugiere abrir canales de investigación que busquen romper estas barreras, y permita lograr una aplicabilidad real de la norma GTC-ISO 18091: 2019 dentro de la gestión local del Municipio

5. CONCLUSIONES

Es evidente que la sociedad cada vez evoluciona y demanda más cosas, por esa razón se ha convertido en una necesidad la aplicación o desarrollo de algún sistema de gestión de calidad de políticas públicas. No obstante, existen limitantes como: desconocimiento práctico, dudas para el diseño del modelo de gestión y bajo compromiso de los funcionarios. Por tal motivo, el gobierno y los sistemas administrativos locales requieren aceptar el reto de aplicar normas como la GTC-ISO 18091: 2019 a nivel operativo, técnico y humano. Lo cual, da pauta para abrir un nuevo escenario de investigación, el cual radicaría en hasta qué punto una alcaldía está preparada realmente para aplicar dichas normas y para pasar de un contexto diagnóstico y teórico a uno práctico y real.

Lograr una administración confiable, factible y con desarrollo sostenible, es prioritario en la actualidad. Por esa razón, plantear una forma de articular la norma GTC-ISO 18091:2019 con el plan de gobierno local de las alcaldías de Lenguazaque y Fúquene, fue un proceso complejo pero significativo, porque se logró presentar a los municipios el Anexo A: Herramienta de Evaluación del Gobierno Local (GTC-ISO 18091: 2019) en conjunto con el método de Gestión 5W2H, abordando los planes de gobierno y logrando dicha estrategia de articulación.

Al diagnosticar las alcaldías objeto de estudio a través de la Herramienta de autodiagnóstico Municipio Fúquene y la Herramienta de autodiagnóstico Municipio Lenguazaque, se reconocieron por parte del equipo de trabajo municipal las limitantes y las oportunidades de mejora, al igual que los aspectos a favor que tienen los Municipios, frente a los diferentes indicadores presentados en la herramienta diagnóstica, herramienta que de igual manera nos permitió identificar el nivel de desempeño en el que se encontraba cada una de las alcaldías.

Se logró identificar cada eje estratégico, programas, subprogramas y contexto real de cada municipio mediante el plan de gobierno local, estableciendo una proyección a futuro, hacia el logro de una administración confiable, transparente y activa para responder a las necesidades de la población y lograr el alcance de las metas propuestas por los ODS. Proceso de diagnóstico y de autoevaluación que se llevó a cabo por medio de la aplicación del Anexo A de la norma GTC-ISO 18091:2019, lo que permitió establecer relaciones entre el plan de gobierno local y los 39 indicadores propuestos por la norma.

De otra parte, se concluyó que el municipio de Fúquene tuvo más viabilidad de alineación con los indicadores del Anexo A de la norma GTC-ISO 18091:2019, por que los ejes estratégicos del Plan de Gobierno

Municipal y las categorías, tenían un mayor porcentaje de relación, lo que evidenció solo dos indicadores ausentes. En contraste, el municipio de Lenguazaque presentó más dificultad dado que los ejes estratégicos del Plan de Gobierno no estaban agrupados de una manera que permitiera relacionarlos fácilmente con las categorías definidas en el Anexo A, por lo que se encontraron ocho indicadores ausentes.

Finalmente, es importante concluir que a los Municipios se les presentó la propuesta de articulación de la GTC- ISO 18091:2019 con los Planes de Gobierno Municipal bajo la metodología 5W2H. Favoreciendo así, la gestión de gobernanza y enfocándose en la satisfacción de las partes interesadas. Igualmente, se le socializó a cada Municipio el aporte que dan desde la gestión municipal, en relación con los ODS tanto municipales como departamentales.

REFERENCIAS

- [1] ONU, *Objetivos de desarrollo sostenible. Antecedentes*. Organización de las Naciones Unidas, 2018.
- [2] PNUD, *Sustainable Development Goalsfund]. Objetivos de desarrollo del milenio. Objetivos de desarrollo sostenible*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2017.
- [3] GTC-ISO 18091 (ICONTEC) *Sistema de gestión de la calidad. Directrices para la aplicación de la norma ISO 9001 en el gobierno local*, 2019.
- [4] Fundación Internacional para el Desarrollo de Gobiernos Confiables [FIDEGOC] (2019). *La ISO gobiernos confiables (18091) y su relación con la ISO lectoral (54001)*. Recuperado: www.gobiernosconfiables.org
- [5] ISO, International Standard Organization, *ISO 18091: 2019 Sistema de Gestión de la Calidad - Directrices para la aplicación de la Norma ISO 90001 en el Gobierno Local*, 2019.
- [6] Alcaldes de México. *Pionero en obtener la certificación ISO 18091*. Alcaldes de México. 2019. Recuperado: www.alcaldesdemexico.com.
- [7] Alcaldía de Barranquilla. *La capital de Vida capacita a sus funcionarios en la norma internacional ISO 18091*. Alcaldía de Barranquilla, 2017. recuperado: www.alcaldiadebarranquilla.com
- [8] Departamento Nacional de Planeación [DNPCONPES 3918. *Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible en Colombia*. Observatorio regional de planificación para el Desarrollo, 2018.
- [9] H. Rocha, 5W2H: *Que, significa, para que sirve, como aplicarla y algunos ejemplos*. Klickpages, 2015.
- [10] J. Martínez, Métodos de investigación cualitativa. *Silogismo* 8(1), 1-43, 2013.
- [11] E. Lara, *Fundamentos de investigación. Un enfoque por competencias*. 20011, México: Alfaomega,
- [12] E. Bonilla Castro, y S. Rodríguez, *Más allá del dilema de los métodos: La investigación en ciencias sociales*. Bogotá Norma. 2005. Recuperado: <http://laboratoriociudadaddur.files.wordpress.com>
- [13] Municipio de Fúquene. *Alcaldía Municipal de Fúquene en Cundinamarca. Trayectoria Social, Garantía de un Buen Gobierno*. Municipio de Fúquene, 2018.
- [14] Municipio de Lenguazaque *Alcaldía Municipal de Lenguazaque. Construyendo Bienestar*. Municipio de Lenguazaque, 2018.
- [15] Oncíns, S. J., *Norma ISO 18091:2014. Estudio y orientaciones para su implantación efectiva en un municipio*. Universidad Zaragoza, 2018. Recuperado: <http://zaguan.unizar.es/>
- [16] Municipio de Fúquene. *Plan de Gobierno de Fúquene Trayectoria Social: Garantía de Buen Gobierno*, 2019. Recuperado: <http://www.fuquene-cundinamarca.gov.co>
- [17] Municipio de Lengazaque. *Plan de Gobierno de Lenguazaque. Construyendo Bienestar, Lenguazaque 2020-2023. Municipio de Lenguazaque*, 2019. Recuperado: <http://www.lenguazque-cundinamarca.gov.co>
- [18] R. Forbes, y M. Saborío, *ISO 18091:2014 Guía para la aplicación de la norma. ISO 9001:2008 en gobierno locales*. Recuperado: http://municipal.cegesti.org/articulos/artoculo_03_220115.pdf
- [19] S. I. Castaño; S. P. López y C. J. Moscoso. *Propuesta de Articulación del Plan de Gobierno Local con la GTC-ISO 18091:2019*. Proyecto de investigación. Universidad Santo Tomas- Convenio ICONTEC. Bogotá, 2021.
- [20] M. P. Umbarila, *Gestión Asociada del Territorio para la Cualificación de la Evaluación y el Control Social a Políticas Públicas Locales. Una Mirada a Experiencias de Colombia y Bolivia*. Tesis de doctorado. Universitat Jaume I, España, 2017.
- [21] Veeduría Distrital, *Informe ISO/ IWA. 4 observatorio Ciudadano Usaquéen Audiencias local de RPC*. Bogotá. 2015. Recuperado: http://www.veeduriadistrital.gov.co/archivos/Rendicion_Cuentas/2013/OBSERVATORIO%20USAQUEN%202013.pdf
- [22] M. C. Madariaga, *Metodología IWA 4 marco para la consolidación de gobiernos confiables desde una perspectiva ciudadana*. Trabajo de grado especialización. Universidad Militar Nueva Granada, 2019.

Utilización de modelos agregados en procesos de manufactura dentro del sector automotriz

Alejandro Mateos Camacho¹

Mariana Ruíz Morales²

Erick Guillermo Torres Bermúdez³

María Teresa Torres Guerra⁴

Universidad Iberoamericana

México

La presente propuesta plantea el uso de la herramienta de modelos agregados en procesos de manufactura dentro del sector automotriz, la cual consta de seis fases. Algunas de las fases consideradas en este modelo son técnicas existentes dentro del área de la Ingeniería Industrial y tres más se proponen a fin de promover el cumplimiento de las necesidades con los clientes visto desde un enfoque agregado, es decir, un enfoque global en el sistema de producción, promoviendo que las empresas mejoren el entendimiento de su propio sistema de producción y, por lo tanto, su desempeño.

¹ Ingeniero Industrial. Área de Ingeniería y Manufactura. TIFS Automotive.

Contacto: alejandromateos@correo.uia.mx

² Académico de Tiempo Completo.

Contacto: mariana.ruiz@ibero.mx

³ Académico de Tiempo Completo.

Contacto: erick.torres@ibero.mx

⁴ Profesora de Asignatura.

Contacto: mttorresg@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas dedicadas a la manufactura en diversos sectores frecuentemente buscan la manera de incrementar la competitividad bajo diversos enfoques; en algunos casos con enfoque de mejora del funcionamiento interno dentro de la organización o por otra parte se puede llegar a ser más competitivo a través del cumplimiento de las necesidades y requerimientos de los clientes.

Para el lanzamiento de un nuevo programa o proyecto en el sector automotriz, las empresas Original Equipment Manufacturer OEMs brindan los detalles del programa, en particular al conjunto de proveedores que deseen ser partícipes en la fabricación de estos nuevos componentes, de tal manera que se pueden conocer los procesos requeridos para su fabricación al igual que la capacidad necesaria, sin embargo, la falta de herramientas o metodologías que permitan conocer el propio sistema de producción y la forma de responder y adaptarse a nuevos cambios propicia que las empresas proveedoras dentro del sector automotriz destinen recursos no planeados para poder responder a las necesidades y adaptarse. Aunado a ello, la falta de conocimiento a detalle del sistema de producción de las empresas proveedoras y la falta de proyección sobre el funcionamiento para nuevos negocios, limita en ocasiones incrementar los nuevos negocios para una organización.

Hoy en día, las empresas dentro de la proveeduría en el ámbito automotriz, conocidas comúnmente como Tiers (Subproveedores de OEMs), son las principales organizaciones interesadas en cumplir con los requerimientos de las empresas OEMs. Algunos de los principales requerimientos son los específicos del producto, métodos del aseguramiento de la calidad, entre otros. Sin embargo, existen requerimientos adicionales que una empresa OEM demanda del sector de la proveeduría, como, por ejemplo, el análisis de capacidad de la organización, el cuál es modificado con base en el comportamiento volátil del mercado.

Un incremento en la demanda de la fabricación de vehículos genera que las empresas proveedoras deban adaptarse a tal comportamiento y al mismo tiempo, conocer la reacción de su propio sistema de producción en ámbitos de proyección ante la necesidad de adaptación o bien definir los cambios necesarios sobre la capacidad instalada. Comúnmente, bajo estas condiciones en particular se propicia una falta de conocimiento profundo sobre el sistema de producción, originando que las empresas proveedoras deban invertir en diversos recursos para poder reaccionar ante tal cambio, ya que impactan de manera negativa a la organización puesto que dichas necesidades no fueron consideradas al inicio. Siendo el sector automotriz un segmento volátil respecto a la adaptabilidad al comportamiento del mercado, es importante considerar la forma como las empresas reaccionan internamente para poder ganar nuevos proyectos; nuevos modelos de un automóvil.

Por lo anterior, es importante que las empresas tengan un profundo conocimiento de su propio sistema de producción. Bajo este enfoque basado en la prevención y entendimiento del mismo sistema orientado a la productividad con enfoque al servicio al cliente, las organizaciones de hoy en día requieren tener herramientas que permitan conocer, planear y proyectar las nuevas necesidades de los diferentes clientes (OEMs) que impactan su sistema de producción. De otra manera, aquellas organizaciones que no cuenten con el conocimiento requerido sobre su sistema tienden a realizar omisiones importantes en su proceso, como los siguientes: poco entendimiento de las capacidades vendidas al inicio del programa o negocio (actual VS necesario) mismo que se refleja en problemas de capacidad no planeada lo que implicaría solicitar capital para adquirir nuevos equipos impactando significativamente en el Layout de la organización. El término de Layout consiste en una localización exacta de los medios industriales, como maquinaria, equipos, mano de obra, espacios requeridos para para el movimiento de materiales y su almacenaje [1]. Además de lo anterior puede surgir diversas necesidades:

- Definir de personal necesario para un proceso de manufactura.
- Contar con un modelo de estimación confiable de los tiempos de fabricación y recursos necesarios para el lanzamiento de un programa (nuevo vehículo) para cada organización proveedora.
- Disponer de información precisa que permita tomar decisiones para el correcto funcionamiento de los futuros negocios, en aquellos procesos comunes y que vayan a ser necesarios para nuevos programas.

Un modelo agregado de manufactura es una nueva herramienta que permite que los proveedores de autopartes tengan la oportunidad de entender su sistema de producción visto desde la necesidad de satisfacer las demandas de un mercado volátil, practicidad de entendimiento y versatilidad de aplicación en sus operaciones, dicho modelo parte de una secuencia lógica misma que permite responder a las necesidades demandadas de un cliente OEMs, tales como incremento de demanda, proyección de capacidad y aquellos factores que son afectados al satisfacer dicha necesidad. Además, el modelo agregado sirve para tomar mejores decisiones ya que al promover la modelación de información del sistema de producción, se puede generar más competitividad frente a otras empresas similares del sector, lo anterior a través de la mejora en el tiempo de respuesta al encontrarse y cotizar para nuevos negocios.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Capacidad, desempeño y eficiencia

Algunas de las decisiones más importantes en las organizaciones están relacionadas con los productos y servicios que ofrece o manufactura. De ello depende la capacidad, el proceso, la localización y las instalaciones proyectadas para poder lograrlo. Por tal motivo al decidir producir con ciertos requerimientos y una calidad demandada los elementos anteriores deben realizarse de una manera óptima [2]. La dificultad de conocer los requerimientos del cliente (Demanda), relacionado con la capacidad de suministro de los proveedores y los mercados a los cuales se puede proveer (Capacidad) resulta por lo general en un problema de entregas (pronóstico). Es decir, proveer la cantidad correcta en términos de productos en el tiempo requiere de una cuidadosa planeación e inversión en la toma de decisiones. Por dicha razón se deben de considerar los siguientes tres aspectos para la producción de bienes y servicios:

1. Capacidad: ¿Cuánto se puede fabricar por unidad de tiempo?
2. Demanda: ¿Cuánto y cuando requiere el mercado?
3. Pronóstico: ¿Cómo se va a cumplir con la proyección requerida sin hacer desperdicio de recursos?

Una operación debe de ser evaluada con base en la capacidad que puede proporcionar y las opciones que se deben de considerar en cuanto se tenga un incremento o disminución de la demanda.

De acuerdo con [3], una de las principales complejidades que se tiene al momento de estudiar y manejar los cambios en los sistemas de manufactura con respecto a la capacidad es la dinámica en la que se desarrolla el sistema. Es común encontrar que la dinámica está asociada a la demanda de un requerimiento, pero en particular para este caso se refiere a la complejidad de productos y diversidad que caracteriza al sistema. El problema de la dinámica en términos de capacidad ha sido un tema de interés desde hace aproximadamente 40 años, debido a que la capacidad instalada siempre debe estar preparada para así responder a los cambios requeridos por una demanda volátil. Dentro del sector de manufactura, las organizaciones toman decisiones para incrementar rentabilidad, además de decisiones con respecto a los elementos necesarios (equipos, instalaciones, sistemas y personas). El hecho de identificar cuál es el mejor tiempo de implementación sin tener afectaciones propias y hacia los clientes, implica que las organizaciones deben tener un sistema adecuado que permita reaccionar en cualquier momento [4].

Sin embargo, también existen diversos parámetros internos y externos que dificultan la definición y planificación de la capacidad, entre los que se destaca la naturaleza dinámica y estocástica de la demanda, para ello la disponibilidad de la capacidad es vital a considerar ya que se refiere a los tiempos de reacción que se tendrán para poder cumplir con cambios repentinos, así mismo el tiempo necesario de reacción [5], es decir la capacidad de reacción del sistema instalado. Por consiguiente, la compensación tradicional entre la capacidad de respuesta y la rentabilidad agrega una capa de complejidad al ámbito de la gestión de la capacidad y a fin de optimizar ambos objetivos se han realizado diversos estudios analizando a detalle la planificación óptima de la demanda [6].

[7] menciona que, dentro de un mercado tan competido hoy en día, todas las organizaciones enfrentan el desafío de responder a las demandas cambiantes del mercado mientras mantienen un nivel de producción rentable. Este balance no hubiese sido tan fácil sin los nuevos paradigmas de manufactura moderna, con el

aporte de los habilitadores tecnológicos para permitir cambiar su funcionalidad y capacidad. Este ambiente dinámico genera que la gestión en el cambio de la capacidad sea muy dinámica, es por ello que la planificación de la capacidad es inherente a un problema dinámico.

Dado que la planificación de la demanda es de naturaleza dinámica con varias incertidumbres asociadas con la demanda, el tiempo de escalamiento de la capacidad y el tiempo de respuesta o fabricación, pueden asociarse con la complejidad operativa. En el mercado actual, la disposición de cambiar con frecuencia y eficacia el nivel de capacidad se está convirtiendo en una característica fundamental de cualquier sistema de producción exitoso. Sin embargo, la complejidad operativa de este proceso dinámico es un obstáculo en la implementación de dicha estrategia.

[8] define que la utilización de la capacidad, es la relación entre el producto real o rendimiento actual, y el producto potencial, es decir, cuál sería la máxima cantidad a obtener/ rendimiento máximo que se puede obtener por unidad de tiempo. Con relación al rendimiento de producción, la utilización está muy relacionada con las entradas para la maximización de las salidas. La capacidad subutilizada es una división entre las actividades que son utilizadas como entradas y que no agregan valor a una operación, lo cual se convierte en ineficiencia dentro de un proceso, cuellos de botellas, problemas laborales y fallas en el suministro de energía que contribuyen a la capacidad subutilizada [9].

Tener muy poca capacidad resulta en una insatisfacción de los clientes y pérdida de oportunidades, por otra parte, la capacidad no utilizada origina un desperdicio que representa costos más altos para las organizaciones. Algunos cambios en capacidad pueden suceder de manera casi inmediata, en otros casos podría tomar un tiempo más prolongado. Es decir, la capacidad de una operación es una mezcla complicada de recursos, los cuales son la entrada a los procesos que permiten ser expandidos y contraídos, si éstos se modifican, es decir, que se depende de la flexibilidad de los recursos o entradas. La capacidad puede ser incrementada utilizando diversos métodos que incluyen ajustar los recursos y entradas en una organización como, por ejemplo:

- Considerando un nuevo número de materiales y enfoques
- Incrementando el número de servicios proporcionados o equipos
- Incrementando el número de horas operativas
- Adquiriendo instalaciones adicionales

Por otro lado, disminuir la capacidad puede ser un poco más complicado y costoso, por tal motivo la decisión de alterar la capacidad debe de tomarse cuidadosamente de acuerdo a las predicciones de la demanda.

La administración dentro de una empresa tiene dos objetivos distintivos con relación al control de sus operaciones. El primero es la medida del desempeño, la cual esta comúnmente evaluada por el tiempo estándar y la capacidad de utilización y el segundo en cuanto a control de costos [10]. El seguimiento a la asignación de los tiempos estándar y la relación con los costos, produce un control de costos de los procesos, así como una correcta evaluación de los reportes de desempeño.

Se ha definido el tiempo estándar como la duración del tiempo que transcurre desde el inicio de la operación hasta la conclusión de la misma, implica además la consideración de todas las actividades que se realizan en la operación. Algunos de los principales elementos que estudia están relacionados con el proceso, la espera, el movimiento y la inspección [11].

En el ámbito de la ingeniería y administración se asocia la palabra eficiencia con qué tan bien una acción relevante es realizada y si se logra alguna actividad con mínimos recursos. La eficiencia operacional se entiende como la actividad de entregar productos y servicios eficientemente sin comprometer la calidad de éstos. Los métodos para la medición de la eficiencia dependen de los niveles de análisis a los cuales se desea obtener; estos niveles de medición se pueden obtener desde niveles micro, nivel en donde es posible hacer la medición de la eficiencia operacional en elementos como equipo o maquinaria, estaciones de trabajo o colaboradores dentro de una organización, mientras que la medición a nivel macro se refiere a la medición de la organización considerando la mayoría de las áreas o sólo en áreas clave definidas por la

organización. Una base fundamental para realizar la medición de la eficiencia es la evaluación del desempeño a nivel operacional, con el objetivo de aplicar posteriormente medidas cuyo fin sea mejorar la productividad, para después promover el análisis de la eficiencia a niveles superiores [12].

Eficacia y eficiencia son excluyentes y al mismo tiempo influyen entre sí, como se puede observar en la ecuación (1), por ello es importante para la administración asegurarse del éxito en ambas métricas.

$$\text{Desempeño organizacional} = (\text{Eficiencia}) - (\text{Eficacia}) \quad (1)$$

2.2 Modelos de capacidades

The Ambitious Science Teaching [13] menciona que un modelo es un objeto que refleja cambios pensando en un conjunto de ideas. Algunas de las razones por las cuales se deben utilizar modelos son:

- Generar mejor entendimiento de un fenómeno implica tener un ajuste más preciso de los parámetros.
- Cuando se trata de manejar parámetros, conocer cuando se tiene un comportamiento fuera de los límites, ayuda a detectarlo, analizarlo o excluirlo respectivamente.
- Encontrar valores de los parámetros que llevan a un resultado

La construcción de un modelo matemático usualmente significa un mejor control sobre un fenómeno, el cual se traduce en tener mayor precisión, obteniendo resultados sin una alta demanda de inversión y una mejor calidad de las salidas. Para la construcción de un modelo inicialmente se considera una cantidad pequeña de información y se construye una mejor representación del fenómeno del que se trata de explicar utilizando al mismo tiempo predicciones [14]. Existen diversos modelos matemáticos para la toma de decisiones que se basan en el análisis de la situación [15].

La capacidad de producción de una organización es definida como los productos que pueden ser manufacturados con el soporte de un método específico y con el objetivo de cumplir con un plan de entregas o ventas. Estas actividades deben realizarse de tal manera que el trabajo sea ejecutado con los recursos y capital disponibles, procurando la máxima ganancia posible.

La planeación de la capacidad es un elemento vital en el proceso de toma de decisiones, en particular en el cambio de situaciones o cantidades dentro de un sistema de producción. Por lo tanto, el modelado matemático crea un gran número de posibilidades para la planeación de la capacidad de producción, tanto para empresas de pequeña o gran escala.

Durante el diseño de un sistema de producción uno de los principales enfoques que se busca más allá del detalle de la medición del desempeño u objetivos, es el interés orientado a la capacidad del sistema, por tanto, determinar la capacidad del sistema repercute en los resultados alcanzados. La ejecución junto con la planeación debe tener un nivel mínimo de variación o por lo menos tener un valor conocido y consensado por parte de quien lo planea [15].

Mientras que el detalle de desempeño de los objetivos puede ser desde la entrega de un producto específico en un tiempo adecuado, el objetivo de la capacidad, también conocido como objetivo agregado, es aquel objetivo que se enfoca directamente al comportamiento global del sistema de producción, expresado en una unidad. Una de las principales tareas en el control de la producción es generar un producto detallado bajo un buen aprovechamiento de la capacidad.

El principio fundamental para modelar sistemas de capacidad es considerar desde un inicio la existencia de objetivos expresados en agregados, es decir enfocados al funcionamiento global del sistema de producción, por esta razón al definir la estructura de un modelo se pueden definir los controles agregados [16]. Para el análisis del ambiente en el diseño de un proceso, es importante revisar en paralelo la planeación del proceso, así como también aspectos financieros, inversión, capacidad y una extensa planeación del proceso operacional.

2.3 Sistemas avanzados de manufactura

En años recientes los sistemas avanzados de manufactura AMSs han tomado mayor importancia debido a la introducción de nuevos mercados, mismos que combinan diferentes tecnologías y equipos en los sistemas de manufactura.

En el momento de diferenciar a las nuevas arquitecturas en los sistemas avanzados de manufactura, se pueden encontrar los siguientes: transferencias de líneas flexibles, células flexibles de manufactura y sistemas flexibles de manufactura [17]. Es importante mencionar que mientras algunos ya han sido explorados y son conocidos, algunos otros son particularmente complejos por diversas razones, puesto que se requiere de una gran cantidad de inversión; además, resulta difícil conocer el comportamiento de los futuros escenarios y los riesgos que implican.

Para que un sistema avanzado de manufactura pueda ser rentable a largo plazo, un sistema de producción debe de ser eficiente y al mismo de tiempo debe estar alineado a la estrategia de la organización, aun en la práctica si se tiene una buena ejecución de un sistema de producción éste puede tener conflictos si se separa de la estrategia de la compañía.

La selección de la capacidad ha cobrado mayor relevancia para las empresas de manufactura ya que una buena o mala decisión puede afectar profundamente en la rentabilidad de la organización para poder invertir en adquirir nueva capacidad. En la práctica, debido a que incrementar la capacidad tiene un alto costo, no es posible solucionar la falta de ésta simplemente adquiriendo capacidad extra para poder hacer frente a todos los posibles cambios de requerimientos futuros, sino que es necesario saber cuál es la capacidad necesaria exacta para así saber el costo de mantener dicha capacidad. Todos estos aspectos tienden a obstaculizar la exploración de nuevas oportunidades ofrecidas por los sistemas avanzados de manufactura.

El problema de la planeación de la capacidad en AMSs ha sido profundamente investigado en los últimos 20 años, Sin embargo, la mayoría de las metodologías no ofrece una solución integral al problema completo, sino que limita su enfoque a algunos sub problemas o problemas menores ya definidos [17].

El tiempo ciclo (t) es el tiempo necesario para procesar una parte o un producto en un equipo. El tiempo ciclo quizá sea constante, variable o aleatorio. En sistemas de producción de gran escala (t) es prácticamente siempre constante o tiende a estar muy cerca de ser constante. Este es el caso de la mayoría de los sistemas de producción en la industria automotriz y electrónica, entre otras. Mientras que el tiempo ciclo variable o aleatorio (τ) es utilizado en ambientes de orden de compra, es decir, donde cada parte probablemente tenga diferente especificación de procesamiento o manufactura [18].

La capacidad del equipo (c) se refiere al número de partes o productos manufacturados por unidad de tiempo cuando el equipo está en funcionamiento, lo anterior se representa en la ecuación (2).

$$c = \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

Donde:

c = capacidad del equipo

τ = tiempo ciclo variable o aleatorio

Existen otros casos en donde se tienen equipos en un sistema de producción que tienen tiempos ciclo idénticos o diferentes. En caso de que los tiempos ciclo sean idénticos o se tengan los mismos equipos o máquinas, se consideran como síncronos, de otra manera son considerados como asíncronos, ya que son diferentes desde el inicio y hasta el final de una operación.

La velocidad de producción PR es el promedio de número de partes manufacturadas por el último equipo o máquina dentro de un sistema de producción por tiempo ciclo en el estado estable del sistema de producción. De esto se deriva que la velocidad de producción es considerada un indicador en un sistema

de producción, mismo que es apropiado para los sistemas de producción en donde todos los equipos tienen un tiempo ciclo similar. Por el contrario, el rendimiento (*TP-Throughput*) es el promedio del número de partes producidas por el último equipo dentro de un sistema de producción por tiempo ciclo en el estado estable de la operación del sistema. *TP* puede ser usado como caso síncrono, y se calcula a través de la ecuación (3).

$$TP = c \cdot PR \quad (3)$$

Donde *c* es la capacidad del equipo.

Un modelo matemático de un sistema de producción se puede definir con base en los siguientes componentes [18]:

1. Tipo de sistema de producción: el cual muestra cómo los equipos y el material y los controles de los mismos están conectados y al mismo tiempo definen el flujo de las partes dentro del sistema.
2. Modelos de los equipos: cuantifican la operación de los equipos vista desde el punto de productividad, fiabilidad y calidad.
3. Modelos de los controles de manejo de materiales: cuantifican sus parámetros, los cuales afectan en el rendimiento de todo el sistema.
4. Reglas de interacción entre los equipos y controles en el manejo de materiales: definen como los estados de los equipos y los controles en el manejo de materiales afectan el uno al otro, resultando como consecuencia la unicidad o cohesión de la descripción matemática.
5. Medidas de desempeño: que cuantifican la eficiencia de la operación, siendo el punto central de análisis, mejora continua y diseño de métodos.

Moore y Jablonski [19] clasifican a los tipos de sistemas de producción de la siguiente manera:

1. Sistemas de producción en serie
2. Sistemas de producción modular
3. Sistemas de producción intermitente
4. Sistemas de estructural

Las fases que se pueden considerar para generar el proceso de modelación de un sistema de producción son [20]:

1. Investigación de la distribución de planta: es importante que, desde el diseño de un nuevo sistema de producción, se identifique la distribución del equipo.
2. Modelo estructural: una vez identificada la ubicación y el flujo del proceso, se puede definir cuál es el tipo de sistema de producción que se tiene.
3. Identificación de parámetros del equipo: conocer el tiempo ciclo del equipo, coeficiente de variación del equipo, el tiempo promedio de paro, resulta en tener un mejor diseño de modelación ya que se consideran diferentes parámetros.
4. Identificación de parámetros de buffer (banco): determinar cuál es la capacidad del sistema de producción, en términos de poder tener un buffer en alguna de las etapas o procesos del sistema de producción.
5. Validación del modelo: finalmente, la comparación de las predicciones del modelo permite tener retroalimentación del diseño y mejora del mismo.

Para la entrega de un servicio, el alcance de un modelo está basado en la estimación de la demanda considerando los recursos disponibles, así como la administración de los mismos como, por ejemplo, el tiempo que va a ser dedicado para cada uno de ellos hasta lograr un buen desempeño. Frente a cualquier

cambio en el requerimiento es necesario poder analizar el impacto de los costos que afecta directamente al desempeño de la capacidad del sistema de producción.

3. MÉTODO

Un modelo de manufactura en su concepto más simple es la forma lógica en la cual una organización puede representar el comportamiento de un conjunto de variables que interactúan entre sí. En ocasiones el modelado permite ayudar a visualizar aspectos que no pueden ser observados directamente. Normalmente debido a la complejidad de los modelados de sistemas de manufactura, éstos se limitan a los productos y los procesos necesarios para su fabricación, aunque no sólo los procesos están involucrados sino también se requiere de un equipo de colaboradores que tenga asignado roles y funciones [17].

La implementación y desarrollo de un modelo agregado de manufactura es una herramienta que permite a las organizaciones, en nuestro caso a los proveedores de autopartes, entender desde lo global a lo particular su propio sistema de producción, mismo que evoluciona constantemente en un ambiente dinámico. Esto permite responder a las necesidades de un mercado volátil, por parte de las OEMs, entre las que destaca la demanda, contrastada con la capacidad instalada o requerida. A través de la modelación de información del sistema de producción, se puede responder de mejor manera a las necesidades de las OEMs actuales y adicionalmente permite tener un mejor entendimiento para incrementar la competitividad y atraer nuevos negocios.

El modelo agregado de manufactura se desarrolló bajo una serie de fases fundamentadas en la metodología que se muestra en la Figura 1.

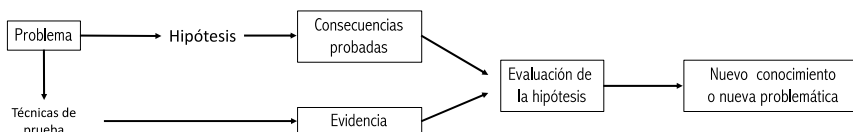


Figura 1. Diagrama de flujo de investigación

El modelo de manufactura agregado propuesto consta de seis etapas principales. Se inicia con una fase de conocimiento y entendimiento de la operación. Una vez que se conoce cómo funciona, surge la necesidad de saber cuánto tiempo se utiliza para realizar cada proceso u operación; fase 2. Posterior a esta fase se tiene una fase de simulación del comportamiento del sistema, es decir la interacción entre variables o actividades inmersas en la operación. Una vez realizadas las 3 primeras fases se revisa qué posición tiene la organización en términos de crecimiento y productividad. En esta fase se determina si se está en posición de crecimiento interno, posibilidad de nuevas adquisiciones de negocios o bien necesidad de mejora en desempeño. Si la oportunidad es de crecimiento, la simulación permite representar el comportamiento de un sistema sin tenerlo físicamente con el fin de poder entender su funcionamiento lo más cercano a la realidad, lo anterior con ayuda de resultados obtenidos en estudios realizados en los diversos procesos o procesos similares y finalmente la última fase consiste en modificar y proyectar el comportamiento de las variables ante distintos escenarios requeridos por parte de un mercado, es decir un cliente u OEMs. La Figura 2 muestra de forma esquemática estas seis etapas.

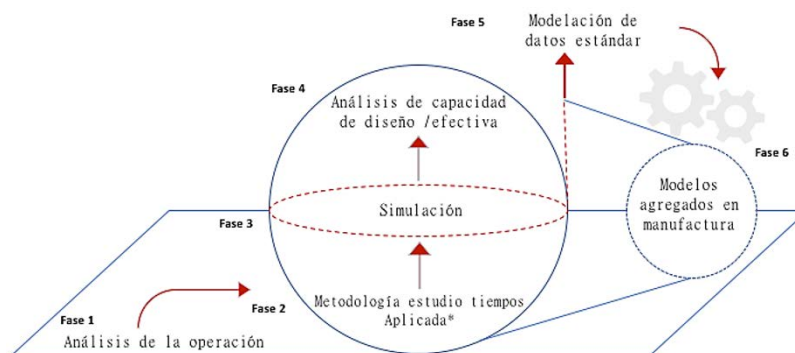


Figura 2. Esquema de modelos agregados en sistemas de producción

- *Fase 1: Análisis de la operación.* La fase inicial permite que desde un inicio cualquier organización pueda conocer y detallar su operación, es decir que cada uno de los procesos de transformación o manufactura necesitan ser definidos, analizados, entendidos y validar que cada uno de los procesos sea realizado con base en un procedimiento estándar definido por la organización y/o alineado a un procedimiento corporativo. Lo anterior con el objetivo de que la organización identifique el nivel de estandarización en los procesos, principales factores que influyen positivamente y negativamente en la estandarización, desperdicios y oportunidades de mejora, como fase inicial de identificación.
- *Fase 2: Metodología estudio de tiempos aplicada.* Esta fase inicia una vez que la organización tiene un nivel de conocimiento adecuado en cuanto a las actividades que agregan valor y las que no en los procesos de manufactura y en el sistema de producción, y a su vez identifica en qué proporción impactan a la operación aquellas que no agregan valor. Considerando que las operaciones a analizar son conocidas, es momento de poder desarrollar la segunda fase del modelo agregado de manufactura, lo que estimula a la organización a que consense cuál o cuáles metodologías o técnicas se utilizarán para los fines que el modelo agregado de manufactura oriente. Aunque existen diferentes técnicas de toma de tiempos en los procesos de producción, para fines de la implementación del modelo agregado de manufactura, únicamente se considera el tiempo en el que un proceso u operación es realizado con un resultado aceptable, es decir que cumple con las características establecidas por la organización y el cliente.
- *Fase 3: Modelación y Simulación.* El proceso de modelación es una herramienta fundamental ya que permite representar información existente dentro de los distintos procesos o subsistemas dentro de un proceso productivo, su funcionalidad ayuda a que las organizaciones puedan conocer de mejor manera aquellos factores que afectan a dichos sistemas, otra funcionalidad es la de poder estimar o simular mejores comportamientos de ciertas variables o indicadores como puede ser desde la eficiencia del sistema o subsistema, estimación de tiempos de fabricación, actualizaciones y proyecciones de capacidades instaladas, entre otros.
- *Fase 4: Análisis de capacidad efectiva.* La capacidad efectiva representa para las organizaciones la máxima tasa de producción alcanzable para manufacturar productos u ofrecer servicios en un periodo de tiempo en específico. Para ello, los componentes más significativos para tener una capacidad efectiva son los procesos eficientes y el correcto desarrollo del capital humano. Asimismo, se tiene que diferenciar entre la capacidad de diseño o instalada (ecuación (4)), capacidad efectiva y capacidad actual. Al referirse a capacidad de diseño, se hace referencia a la producción teórica máxima que un sistema puede alcanzar bajo condiciones ideales.

$$\text{Capacidad de diseño} = C_{up} * U_p * H_t \quad (4)$$

Donde:

C_{up}: Capacidad de una unidad de producción. Ejemplo: 50 unidades/hr

U_p: Unidades de producción. Ejemplo: 5 equipos, 5 personas.

H_t: Horizonte de tiempo proyectado o planeado. Ejemplo: 8 hr

La mayoría de las organizaciones utilizan sus instalaciones a una capacidad menor que la capacidad de diseño, lo que permite que la organización trabaje con más eficiencia y pueda extender los recursos disponibles si tuviera la necesidad de ello.

- *Fase 5: Modelación de datos estándar.* La modelación de los datos obtenidos en estudios realizados en la organización puede generar un modelo dentro del sistema de producción siendo una herramienta útil y confiable que brinde a la organización la ejemplificación de una parte del sistema de producción. Hodson [10] define que un dato estándar en una colección de valores de tiempo para las diferentes operaciones dentro de un sistema productivo, dichos valores son codificados de forma gráfica, tabular, o mediante expresiones lógicas. La información debe ser definida correctamente y debe ser útil. Por ello, para la elaboración de los datos estándar se deben seguir ciertos principios básicos, el primero de ellos es que en las operaciones donde se requiera tener los datos estándar, se tengan definidos

correctamente los bloques constructivos, es decir, cuales son los elementos de trabajo. Dicho de otra manera, sea cual sea la técnica de medición elegida, todos los elementos de trabajo deben ser conocidos, entendidos y consensados a manera de poder determinar si es propiamente un elemento perteneciente a la operación y así ser medido y descrito adecuadamente.

Los datos tipo o estándar constan de un procedimiento de siete pasos, este procedimiento se considera como herramienta de modelación, sin importar cual haya sido la herramienta de medición de trabajo seleccionado [10]:

1. Análisis de la operación.
 2. Identificación y selección de elementos de la operación.
 3. Recolección de los tiempos estándar de los elementos seleccionados.
 4. Selección de modelos de representación de datos estándar.
 5. Elaboración del modelo.
 6. Instrucción para el uso del modelo de datos estándar.
 7. Establecimiento de tolerancia.
- *Fase 6: Modelos agregados en manufactura.* La última fase permite que se pueda conocer el comportamiento de un sistema de producción y se pueda predecir el comportamiento del sistema controlando variables propias de cada proceso, sin necesidad de haberse implementado aún, es decir, ser una herramienta que permita a las empresas ser más competitivas a través de mejorar el tiempo de respuesta ante variaciones en la demanda y en la incursión de nuevos mercados. Los principales modelos aplicables a esta investigación son:
 - *Modelo Matemático simple.* De acuerdo con [23], un Modelo matemático puede ser definido como una fórmula o una ecuación que exprese las características esenciales de un sistema físico o un proceso en términos matemáticos. En su forma más general, puede ser representado como una relación funcional en la ecuación (5).

$$\text{Variable dependiente} = f(\text{Variables independientes, parametros, funciones de fuerza}) \quad (5)$$

Donde la variable dependiente es una característica que típicamente refleja el comportamiento o estado del sistema, las variables independientes son comúnmente las dimensiones, tales como el tiempo y el espacio a lo largo del cual se determina el comportamiento del sistema, los parámetros reflejan las propiedades, características o composición del sistema, y finalmente las funciones de fuerza son influencias externas que actúan sobre las mismas. Otro enfoque relacionado a la modelación es la aportación de [24], quien menciona el modelado matemático con la funcionalidad de poder contribuir a la comprensión de los fenómenos reales, sin embargo, para el proceso de modelado es importante elegir y delimitar el problema de estudio.

Es importante mencionar que los modelos matemáticos de la física contribuyen a la base de los modelos matemáticos de otras disciplinas. Asimismo, considerando una visión determinista del modelado matemático se presupone que el fenómeno en estudio lo rige cierta ley, la cual logra determinar las consecuencias a partir de las causas, por lo que se dice que es posible expresar esta ley en términos matemáticos. Por ello, [24], define que el proceso de modelado matemático consta de las siguientes cuatro etapas:

1. Estudio de la situación actual
 2. Elaboración del modelo Matemático
 3. Solución del modelo
 4. Validación del modelo
- *Modelo de regresión lineal.* De acuerdo a Montgomery D. [21], el análisis de regresión es una técnica estadística para investigar y modelar la relación existente entre variables, ya que esta técnica es muy versátil se encuentra en diferentes áreas de investigación. En su estructura más simple se entiende a través de la siguiente ecuación (6).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (6)$$

Donde:

β_0 es la ordenada al origen

β_1 es la pendiente

x Variable independiente, variable predictora o regresora

y Variable dependiente o variable de respuesta

[21] menciona que existen tres métodos básicos de recolección de datos: 1) Datos históricos, 2) Datos obtenidos por medio de un estudio observacional, y 3) datos que son obtenidos a través de un experimento diseñado. Con base en lo anterior, los modelos de regresión lineal pueden tener diferentes aplicaciones, sin embargo, las siguientes son las más comunes:

- Descripción de datos
 - Estimación de parámetros
 - Predicción y estimación
 - Control
- *Modelación en Matlab®.* El nombre de Matlab® proviene de la abreviatura Matriz Laboratory (Laboratorio Matricial) y es una herramienta sofisticada de computación el cual, como varios otros en el mercado, está enfocado a resolver problemas de matemáticas. Matlab® se destaca por ser superior en los cálculos que involucran a matrices, mientras que otras herramientas disponibles destacan por su cálculos simbólicos y procesos matemáticos más complicados [22]. Para la primera modelación en la herramienta de Matlab® se decidió utilizar la herramienta de Curve fitting (Ajuste de curvas), esta herramienta dentro de Matlab® proporciona una aplicación y funciones para el ajuste de curvas, así mismo también genera una superficie a los datos del estudio [22].

Curve fitting también permite que una vez que los datos han sido medidos, tabulados, ayuda a determinar una función, es decir una curva que *mejor* describa la relación entre dos o más variables, además es posible que realice una aproximación a lo desconocido. Consideraciones para asumir una relación lineal dentro de Matlab®:

- Posible relación lineal entre variables x y y , expresada en la ecuación (7).
- Asumir la relación de la ecuación (7).

$$y = a_0 + a_1 x \quad (7)$$

- Determinar a_0 y a_1 que mejor definen el *mejor ajuste* de línea, una ventaja de utilizar esta herramienta es saber cómo se va a determinar el *mejor ajuste*.
- Dado al ruido dentro del sistema, no es posible medir exactamente cada y
- Por lo que los valores medidos son aproximaciones, es decir con un valor más próximo se determina el valor de y más algún error aleatorio o algún error residual (ecuación 8).

$$\begin{aligned} \hat{y} &= y + e \\ \hat{y} &= a_0 + a_1 x + e \end{aligned} \quad (8)$$

Dado que los datos que generan ruido no se agrupan en una sola línea, puesto que existe una discrepancia entre cada punto y la línea ajustada a los datos, el error residual se expresa en la siguiente ecuación (9).

$$e = \hat{y} - a_0 - a_1 x \quad (9)$$

Para el análisis de Bondad de Ajuste se cuantifica la dispersión de los datos sobre la media antes de la regresión (ecuación 10).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = S_e \quad (10)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La presente investigación fue desarrollada con el fin de implementar la herramienta de modelos agregados en una empresa de manufactura Business to Business B2B, nivel Tier 1 y Tier 2 a la vez. Como empresa Tier 1 significa que en su mayor proporción su producción está destinada a cumplir con la demanda directa de una OEM, es decir los productos manufacturados les llegan directamente a las distintas empresas armadoras.

El objetivo era responder a las necesidades actuales de la organización, considerando los nuevos enfoques avanzados en los sistemas de producción. La rápida evolución de la organización en diferentes ámbitos sin duda ha tenido un impacto positivo dentro de la organización en cuanto a crecimiento y generación de competitividad, sin embargo, dichos cambios han ayudado a visualizar las oportunidades en las que la organización debe enfatizar a mayor detalle, pues algún cambio dentro de los mismos podría tener un efecto significativo a corto, mediano o largo plazo en las operaciones. Este crecimiento acelerado de la organización sin duda dejó varias áreas o temas importantes dentro del sistema de producción en circunstancias poco favorables.

El modelo agregado fue desarrollado e implementado en 10 procesos genéricos de la organización, la primera fase 1. Análisis de la operación del modelo, implica que se debe de conocer la naturaleza de cada actividad, es decir, actividades que agreguen valor, actividades que no agreguen y actividades que a pesar de que no agregan valor son indispensables para la operación. Previo a la implementación de la fase en cada uno de los procesos se hizo una breve medición del tiempo ciclo del proceso de manera aleatoria en algunos productos. El resultado obtenido en diversos procesos genéricos fue que existía una gran diferencia entre el tiempo ciclo actual de la operación con respecto al tiempo ciclo planeado o cotizado, por lo que se decidió documentar el proceso actual, identificando las actividades que en realidad pertenecían a la operación.

El paso siguiente fue medir el tiempo estándar de cada operación. En la organización no se tenía una metodología establecida para realizar los estudios de tiempos, no obstante, previo a la implementación de la técnica, cada uno de los procesos se clasificó de acuerdo a su naturaleza, con el fin de definir cuál sería la mejor técnica de medición de toma de tiempos, los procesos fueron clasificados como manuales, semi automáticos y automáticos. Posterior a la clasificación se determinó cuáles metodologías se utilizarían.

Dado que en un inicio se planteó que los tiempos estándar actuales no coincidían con los tiempos cotizados previo a la producción en serie, la primera evaluación que se decidió realizar fue evaluar el impacto de actualizar cada proceso de cada número de parte con los tiempos estándar actuales. Para esta actividad se realizó un análisis preliminar para poder proyectar el impacto con respecto a los costos, sin embargo, dado que el impacto era negativo, puesto que al final se concluía que era más costoso el número de parte o producto; era una labor mayor lo que significaba que el margen de ganancia iba a disminuir. Otro indicador que no correspondía con la situación actual era el número de personal técnico contratado comparado con el requerido en cada programa, cuando se realizó la proyección con este nuevo enfoque esta cifra correspondía con mayor exactitud a la situación actual.

La tercera fase del modelo agregado significó poder realizar la modelación de cada proceso, esta modelación tuvo 2 objetivos, el primero fue determinar la mejor manera de poder proyectar estimaciones previas al lanzamiento de un proceso, y su principal esencia fue que considerara todas las actividades que estaban inmersas en cada uno de ellos, es decir, no sólo el tiempo ciclo de una operación, sino un tiempo estándar. La parte importante fue que estas variables se representaran de manera lógica dentro del modelo y la segunda fue brindar al área de estimadores una referencia actualizada y real de cómo se comportan los procesos actualmente y la diversidad existente. Al final ambos objetivos se cumplieron inclusive en productos considerados como bajo volumen o como refacciones, donde los tiempos estándar de cada proceso se asignaron con base en estos modelos matemáticos.

El objetivo de la cuarta fase, llamada análisis de capacidad diseño/efectiva, fue brindar internamente al área de manufactura una herramienta que tuviera la información actualizada de cada uno los procesos y equipos

con el fin de poder hacer proyecciones de capacidades solicitadas y/o cambio en utilidades por parte de los diferentes clientes, su principal uso actualmente es determinar utilidades y comunicar con mayores argumentos el impacto de cualquier cambio por parte de los clientes (OEMs y Tiers).

La quinta fase para la definición de datos estándar fue más orientada hacia la parte productiva, pues brindó una herramienta para el control de producción, donde destacan la planeación de producción de acuerdo a la capacidad efectiva ya comprobada, el cálculo de eficiencia por zona y las velocidades de la línea en cada sub proceso. Además, cada área fue instruida sobre el proceso de medición, las actividades que fueron consideradas para los estudios y la función primordial de estos nuevos enfoques.

Finalmente, la sexta fase del modelo agregado consistió en visualizar de una manera integral el comportamiento de cada proceso y en general del mismo sistema de producción. Los cambios en el mercado, nuevos retos en flexibilidad de procesos, dinamismo en procesos y mejora en la entrega de respuestas, son los objetivos principales de este nuevo enfoque/herramienta en los procesos productivos.

4.1 Valores obtenidos/Modelos obtenidos

A continuación, se muestra algunos ejemplos de los modelos generados a través de la aplicación (Figuras 3 a 6) de Modelos agregados dentro de una organización que pertenece al sector automotriz, así como el impacto en la mejora de algunos de los indicadores internos (Figuras 7 a 9).

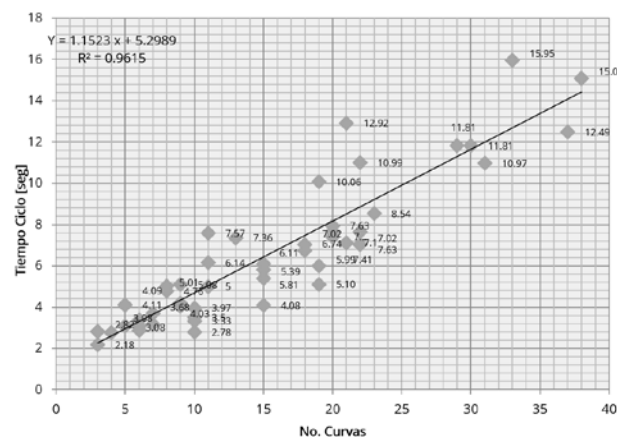


Figura 3. Modelado de Proceso A

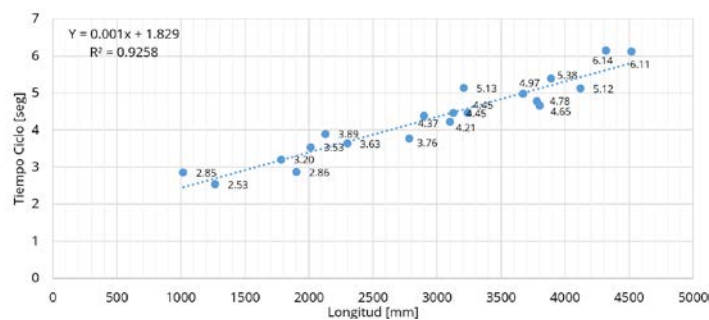


Figura 4. Modelado de Proceso B

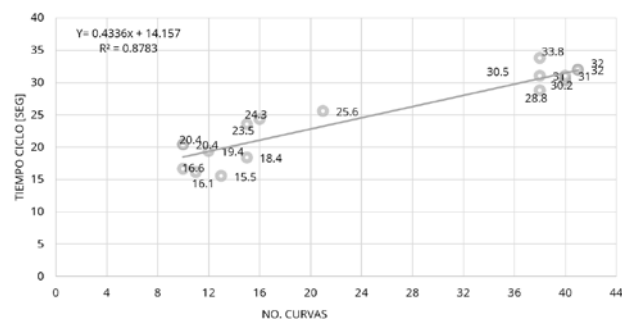


Figura 5. Modelado de Proceso C

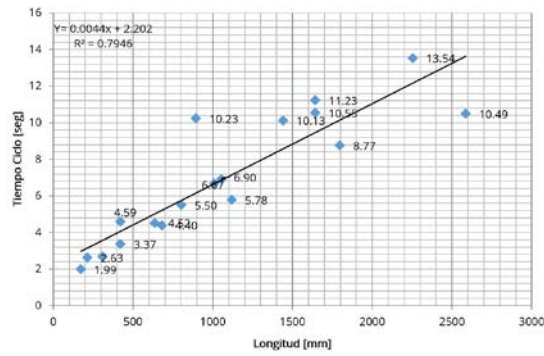


Figura 6. Modelado de Proceso D

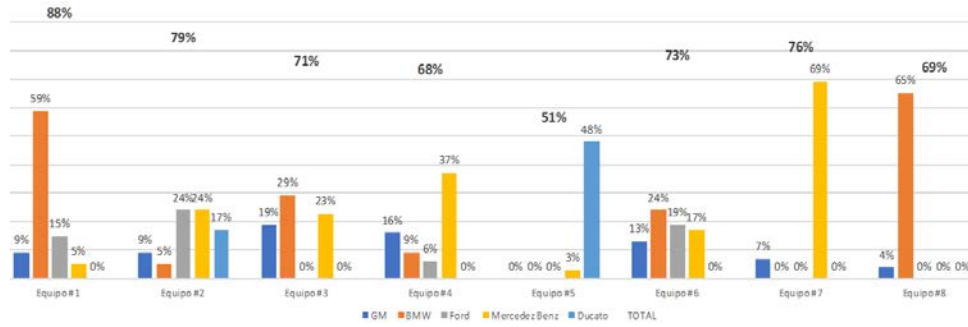


Figura 7. Modelado de Proceso en ambientes dinámicos

Equipo	Hr reales utilizadas	Hr requeridas planeadas	Lunes/Eficiencia
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	20.60	42%
	PL-CO-002	19.44	61%
	PL-CO-003	8.53	43%
	PL-CO-004	28.42	55%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	22.22	57%
	PL-CO-002	18.84	52%
	PL-CO-003	10.76	56%
	PL-CO-004	22.06	78%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	26.89	28%
	PL-CO-002	16.94	58%
	PL-CO-004	46.52	36%
	PL-CO-TMP	21.58	63%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	21.89	43%
	PL-CO-002	21.10	81%
	PL-CO-003	15.44	20%
	PL-CO-004	19.63	48%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	24.78	29%
	PL-CO-002	101.08	59%
	PL-CO-003	8.88	24%
	PL-CO-004	22.42	74%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	25.44	30%
	PL-CO-002	17.85	55%
	PL-CO-003	16.39	50%
	PL-CO-004	20.31	22%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	24.19	29%
	PL-CO-002	23.35	29%
	PL-CO-003	20.71	55%
	PL-CO-004	18.29	45%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	17.31	42%
	PL-CO-002	10.77	69%
	PL-CO-003	18.43	43%
	PL-CO-004	46.12	56%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	21.81	58%
	PL-CO-002	23.92	29%
	PL-CO-003	15.00	41%
	PL-CO-004	16.36	59%
832001 -CORTE DE TUBO EN COIL CUTTER	CO-10-01	21.64	57%
	PL-CO-002	19.70	13%
	PL-CO-003	18.56	55%
	PL-CO-004	22.26	58%

Figura 8. Seguimiento de eficiencia 2018

Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Lunes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	12.00	9.82	82%
	PL-CO-002	21.97	19.53	89%
	PL-CO-003	14.47	8.85	61%
	PL-CO-004	20.32	15.20	75%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Martes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	61.35	28.66	47%
	PL-CO-002	19.40	17.92	92%
	PL-CO-004	20.38	16.54	81%
	PL-CO-TMP	14.26	12.82	90%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Miércoles/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	22.63	15.51	69%
	PL-CO-002	19.60	15.91	81%
	PL-CO-003	17.99	11.14	62%
	PL-CO-004	22.35	16.03	72%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Jueves/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	10.79	7.46	69%
	PL-CO-002	20.92	15.27	73%
	PL-CO-004	21.72	13.46	62%
	PL-CO-TMP	20.50	16.01	78%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Viernes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	18.29	17.15	94%
	PL-CO-002	20.74	17.26	83%
	PL-CO-004	19.09	14.98	78%
	PL-CO-TMP	23.01	15.84	69%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Lunes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	11.77	8.17	69%
	PL-CO-002	24.44	17.97	74%
	PL-CO-003	1.56	0.83	53%
	PL-CO-004	22.48	14.91	66%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Martes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	14.11	8.63	61%
	PL-CO-002	18.29	15.70	84%
	PL-CO-003	5.53	3.75	68%
	PL-CO-004	23.04	14.16	61%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Miércoles/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	22.22	16.69	75%
	PL-CO-002	17.11	12.51	73%
	PL-CO-003	11.79	9.62	82%
	PL-CO-004	16.94	15.42	92%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Jueves/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	23.20	4.42	19%
	PL-CO-002	18.07	14.46	80%
	PL-CO-003	19.15	16.09	84%
	PL-CO-004	19.66	12.19	62%
Equipo	Hr reales utilizados	Hr requeridas planeadas	Viernes/ Eficiencia	
832001 -CORTE DE TUBO BN COIL CUTTER	CO-10-01	18.44	12.27	67%
	PL-CO-002	19.91	14.79	74%
	PL-CO-003	1.18	0.72	61%
	PL-CO-004	23.78	15.44	65%

Figura 9. Seguimiento de eficiencia 2020

5. CONCLUSIONES

Desde hace un par de décadas, la industria automotriz ha desarrollado nuevas iniciativas dentro de la manufactura de vehículos y nuevas soluciones para cumplir con las necesidades de los clientes. Como se ha mencionado previamente, los cambios demandados por parte del mercado agregan nuevos retos para todas las empresas que están dentro del sector, desde empresas OEM, la red amplia de proveedores o proveeduría de autopartes y cadenas de distribuidores pues todos ellos hacen parte de este sector.

Cada una de las soluciones brindadas hacia los usuarios finales implica una colaboración por parte de todas las áreas involucradas. Diversas organizaciones han planteado 4 temas transversales en ámbitos de la industria automotriz, los cuales están orientados a tener un fortalecimiento del mercado interno a través de la introducción de nuevas iniciativas que están dirigidas al mejoramiento del medio ambiente, el segundo tiene el fin de mejorar el acceso a mercados internacionales, otra de las áreas en donde el sector ha desarrollado un crecimiento importante es en ámbitos de investigación y desarrollo y finalmente se encuentra el cuarto tema el cual es orientado a mejorar el entorno del negocio.

El planteamiento de esta investigación tiene como principal usuario a aquellas empresas que son proveedoras de OEMs; sin embargo, esto no se limita a este sector de manufactura, sino que puede ser extrapolado a otros con situación similar a las empresas del sector de la proveeduría. Los modelos agregados se plantean como una nueva herramienta que permite a estas organizaciones dentro del sector mejorar el entendimiento de su sistema de producción, teniendo como objetivo principal responder a las

necesidades actuales de un mercado volátil por parte de las OEMs, mejorando la practicidad para el entendimiento del mismo y la versatilidad en la aplicación de las operaciones a través de una secuencia lógica.

Los Modelos Agregados desarrollados en este proyecto adicionan 3 nuevas metodologías al área de Ingeniería Industrial cuya efectividad ha sido probada. Además, esta nueva herramienta brinda la flexibilidad necesaria para ser utilizada en otras organizaciones, respondiendo a los nuevos cambios en el mercado, puesto que su enfoque ayuda a que continuamente se pueda actualizar la información en el modelo de acuerdo con la finalidad de cada organización. Es por ello que se concluye que la herramienta de Modelos Agregados se perfila para un uso creciente en nuevos negocios en los ámbitos de la ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] R. G. Criollo. Estudio del trabajo: *Ingeniería de Métodos y medición del trabajo*. 2da ed. México: Mc GrawHill, 2005.
- [2] J. R. Paredes. *Planificación y control de la producción*. IDIUC, Instituto de Investigaciones, 2001
- [3] H. A. ElMaraghy. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer-Verlag 2009.
- [4] Leondes, C.T. *Control and Dynamic Systems. Advances in Theory and Applications*. San Diego, California, United States of America, Academic Press Rapid Manuscript Reproduction, 1992.
- [5] Hübl, A. *Stochastic Modelling in Production Planning Methods for Improvement and Investigations on Production System Behaviour*. Wiesbaden, Germany: Springer Gabler, 2018.
- [6] Luss, H. *Operation research and capacity expansion problems: A survey*. Operation Research, 1982
- [7] Wiendahl, H.P. *Changeable Manufacturing- Classification, Design and Operation*. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2007.
- [8] James F. R. *Measuring capacity utilization in manufacturing*, in FRBNY Quarterly Review/Winter p.p. 13-28.
- [9] De Koster M. B.M, *Capacity Oriented Analysis and Design of Production systems*. Berlin, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg (1989).
- [10] Hodson, W. Maynard. *Manual del Ingeniero Industrial, 4ta ed*. México: McGrawHill, 1996.
- [11] Niebel, B. & Freivalds, A. *Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo* 13ª ed. México: McGrawHill. 2014.
- [12] J. Ruffier, *La eficiencia productiva. Cómo funcionan las fábricas*, Oficina Internacional del Trabajo. Montevideo: Cinterfor, 1998.
- [13] *Models and Modeling: An Introduction*, 2014. Recuperado: <http://ambitiousscienceteaching.org/wp-content/uploads/2014/09/Models-and-Modeling-An-Introduction1.pdf>
- [14] Science Learning Hub. Pokapū Akoranga Pūtaiao *Scientific modelling*, 2018. Recuperado: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/575-scientific-modelling>
- [15] Scholten, B. *MES Guide for Executives: Why and How to Select, Implement, and Maintain a Manufacturing Execution System*. United States of America: International Society of Automation 2009.
- [16] Meerkov, M. S., Li, J. *Production Systems Engineering*. Berlin, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [17] A. Matta. *Design of Advanced Manufacturing Systems. Models for Capacity Planning in Advanced Manufacturing Systems*. Berlin, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [18] Meerkov, M. S., Li. *Production Systems Engineering*. Berlin, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [19] F. G. Moore, R. Jablonski. *Production Control*. New York: McGraw Hill, 1969.
- [20] Tetzlaff, U. A. W. *Optimal design of flexible manufacturing systems*. Berlin, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [21] Montgomery D. *Regresión lineal*. México: Compañía Editorial Continental, 2006.
- [22] Pérez, C. *Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y la Ingeniería*. Madrid. España: Pearson Educación, 2002.
- [23] S. C. Chopra, R. P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, 5ta ed. México: Mc GrawHill, 2007.
- [24] L. C. Gómez. *Modelización matemática: Principios y aplicaciones*. México: Dirección de Fomento Editorial, 2015.

Aplicación de métodos de evaluación de riesgo biomecánico en el contexto empresarial: Una revisión de la literatura

Mauren Natalia Marín Castro¹
Heyder Jhonniéd Useche Cubides²
Magda Viviana Monroy Silva³
Universidad Santo Tomás
Colombia

Los riesgos biomecánicos RBM constituyen una de las principales causas para contraer algún tipo de trastornos musculoesqueléticos TME relacionado con el trabajo. Esta revisión de la literatura tiene como objetivo proporcionar una descripción sistemática de los resultados de las técnicas de evaluación de RBM en cuanto a los factores de postura, manipulación manual y esfuerzos, y movimientos repetitivos en una variedad de actividades económicas. En este estudio se realizó una búsqueda sistemática de investigaciones enfocadas en la evaluación de RBM en las actividades económicas, en la que se utilizaron bases de datos como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, con artículos publicados entre 2015 y 2021. Así mismo, se tuvo en cuenta las recomendaciones de la metodología PICO y PRISMA, donde los estudios que cumplieron con los criterios de inclusión fueron seleccionados para el desarrollo de la investigación. El nivel de rigurosidad y alta calidad de los 50 estudios mostró evidencia constructiva en cuanto a la implementación de los diferentes métodos de evaluación de RBM en diversas actividades económicas. Los resultados de la revisión muestran que existen diversos métodos de evaluación de RBM focalizados en el sector empresarial, de los cuales se destacan REBA, OCRA y cuestionarios estandarizados, que evalúan postura, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas. Se verificó que existen diferentes métodos de evaluación de RBM aplicados en diversas actividades económicas en función de la postura, manipulación manual y esfuerzos, y movimientos repetitivos. Los diversos métodos de evaluación de RBM hacen posible identificar y evaluar los factores de riesgo presentes en los lugares de trabajo, con el fin de presentar opciones de rediseño para reducir el riesgo a un nivel aceptable para los trabajadores.

¹ Estudiante de Ingeniería Industrial, integrante del semillero de investigación en innovación y sustentabilidad SII2.
Contacto: maurenmarin@usantotomas.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Industrial, integrante del semillero de investigación en innovación y sustentabilidad SII2.
Contacto: heyderuseche@usantotomas.edu.coda

³ Ingeniera Industrial, Especialista en Gerencia de Salud Ocupacional y Magíster en Ingeniería Industrial.
Contacto: magdamonroy@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Un riesgo biomecánico RBM es una condición relacionada con el esfuerzo físico que puede estar presente o no en un puesto de trabajo, generando un riesgo a sufrir un daño [1]. Este riesgo, se deriva de diversos factores determinados por las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo una actividad laboral, como la postura que se adopta (postura mantenida, postura forzada, postura prolongada y postura anti-gravitacional), la exigencia de movimientos repetitivos (miembros superiores) o el requerimiento del uso de la fuerza (manipulación manual de carga, halar, empujar y esfuerzo) [2]. El RBM incrementa en la medida en que el esfuerzo físico es más intenso y tiene mayor duración durante la jornada laboral sin posibilidad de pausas para recuperación.

El estudio de los parámetros físicos que considera el RBM, ha permitido establecer que las posturas incómodas son principalmente uno de los factores de rendimiento y problemas potenciales dentro del lugar de trabajo, de allí la importancia de adquirir una postura correcta y la propensión del ambiente laboral para que así sea [3, 4]. Además, que las posturas incómodas, extremas y repetitivas pueden aumentar el riesgo de trastornos musculoesqueléticos TME que se relacionan de manera causal o agravante con las condiciones de los objetos y del ambiente [5].

Los TME derivados del RBM que se deben a la carga física en los movimientos repetitivos, se reflejan en la ejecución de actividades que suelen reiterarse en ciclos cortos, es decir, la reproducción de una característica de la tarea que provoca que el trabajador que la desarrolla esté continuamente repitiendo el mismo ciclo de trabajo, técnicas y movimientos, teniendo así una repercusión negativa en el desempeño de los músculos, huesos, articulaciones, tendones, ligamentos y nervios de las parte del cuerpo (generalmente las extremidades superiores) [6].

Adicionalmente, los TME en extremidades superiores relacionadas con el trabajo se producen a consecuencia de la exposición a factores de riesgo relacionados, entre ellos el uso de la fuerza, que pueden ser producidos por la tensión en los músculos dado el esfuerzo requerido para el desempeño de una tarea, los RBM derivados de la fuerza se dan cuando se superan las capacidades del trabajador, cuando realiza el esfuerzo en carga estática o de forma repetida, y cuando los tiempos de descanso son insuficientes [7].

Los TME representan un problema de salud frecuente en toda la población productiva, puesto que afectan la funcionalidad de músculos, tendones, ligamentos, nervios, articulaciones, cartílagos, huesos o vasos sanguíneos [7, 8]. La mano obrera de diversos sectores económicos como manufactura, construcción, agricultura, entre otros, tienen mayor riesgo de desarrollar TME asociados a los RBM, sin olvidar que hay ciertas características individuales que podrían acentuar el riesgo [3]. Por el origen de las labores, los TME suelen presentarse en mayor porcentaje en las extremidades superiores, teniendo en cuenta que constantemente los trabajadores tienen exposición a condiciones como la vibración mano-brazo, la presión local, el ambiente o superficies fríos, movimientos repetitivos, posturas forzadas o el levantamiento de cargas [9, 10].

Los TME pueden ser descritos como el resultado de un desequilibrio entre las demandas biomecánicas del trabajo y las capacidades funcionales del trabajador, ya que, cuando las demandas son mayores que las capacidades funcionales de un individuo dado, existe una alta probabilidad de desarrollar un TME, que pueden ir desde disfunción muscular, hormigueo, inflamación, hasta lesiones o discapacidades graves; y así, dado caso que ocurra lo contrario, la probabilidad de desarrollar un TME se reduce [11].

En relación con lo anterior, se ha propuesto diversas herramientas que permitan evaluar el RBM con el propósito de definir y priorizar estrategias de prevención y mitigación de los TME. La mayoría de ellas evalúan índices corporales específicos de forma estandarizada con alcances de medición diferentes en función del tipo de herramienta aplicada: auto-reporte, observacional o de medición directa.

Dentro de las herramientas observacionales se pueden destacar, el sistema de evaluación de postura de trabajo Ovako OWAS, el cual sigue unas tablas estandarizadas que unen la posición del eje central del cuerpo; cabeza y espalda, y las extremidades, dando un puntaje a cada una para definir el nivel de riesgo

implicado en cierta labor. Otra herramienta que tiene en cuenta todo el cuerpo es REBA que tiene la ventaja de ser breve y rápida. Hay otros que evalúan partes específicas del cuerpo como RULA que es una evaluación rápida de miembros superiores, al igual que el Check List OCRA que permite evaluar los riesgos asociados a los movimientos repetitivos, este método mide el nivel del riesgo en función de la probabilidad de la aparición de TME dentro de un cierto periodo de tiempo, con el objetivo de evaluar el riesgo de las extremidades superiores del cuerpo. Adicionalmente, existen algunos métodos que evalúan tareas específicas, como la ecuación de elevación de Niosh o los gráficos MAC, que estiman riesgos relacionados con las actividades de manipulación de materiales [12-15].

En relación con la categoría de evaluación de auto-reporte, resaltan herramientas como el cuestionario Nórdico, el cual identifica la sintomatología asociada a TME en segmentos corporales críticos en función de la frecuencia y severidad de la exposición a RBM, esta herramienta puede estimar de forma proactiva el nivel de riesgo y permitir que se tomen medidas preventivas. Otro método es la escala de Borg que es un tipo de autoinforme utilizado para evaluar los niveles de actividad física [16].

Entre los métodos de medición directa, los sistemas inerciales portátiles basados en unidades de medición inercial IMU juegan un papel importante en la evaluación de RBM asociados a la postura, movimientos repetitivos y fuerza. De hecho, en el campo de la evaluación de riesgos, la tecnología de inercia portátil tiene un progreso significativo en comparación con las herramientas tradicionales de evaluación biomecánica especialmente en términos de precisión y la posibilidad de detección y medición automáticas [17].

2. MÉTODO

2.1 Criterios de elegibilidad

Una revisión sistemática agrupa los hallazgos de estudios investigativos diseñados de forma rigurosa y brinda un grado superior de evidencia acerca de la efectividad o eficacia de diferentes intervenciones. Los resultados plasmados en este documento brindan datos actualizados y útiles para la toma de decisiones e incluso dan la pauta para el desarrollo de futuras investigaciones [18]. Así pues, se hace imperativo que la evidencia científica publicada posea la mejor calidad y rigor. La elaboración sistemática de la pregunta de investigación permite al investigador enfocar el problema, identificar las variables del estudio, la población y postular posibles soluciones. Es por esto, que en el presente estudio se realizó una revisión sistemática de literatura enfocada en los métodos de evaluación de RBM aplicados en el contexto empresarial. Se recurrió a la técnica PRISMA, como una opción para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas, por medio de la búsqueda, lectura y descarte de las publicaciones científicas, formulando preguntas claras y enfocadas al tema de investigación.

Para ilustrar las características de la investigación, se adaptó la metodología PICO [19], que utiliza un formato especial para desarrollar preguntas de investigación. Estas siglas en inglés desglosan la representación de sus componentes, tal como se observa en la Figura 1. Con esta herramienta, se buscó mejorar la especificidad y claridad conceptual de la pregunta de investigación y realizar búsquedas que puedan producir resultados de mayor calidad y precisión. Por otra parte, es de gran beneficio la búsqueda de información relevante, que se focalice en el objetivo de la investigación, rechazando información innecesaria, para ayudar a tomar decisiones óptimas basadas en la evidencia [20]. La estrategia PICO para el presente estudio se desglosa en la Figura 1.

2.2 Fuentes de información y estrategias de búsqueda

Para el desarrollo de la presente revisión se consultaron varias bases de datos de contenido académico con los criterios de búsqueda a los que se orientaba el estudio. Además, como herramienta de búsqueda se estableció utilizar un lenguaje de intermediación para establecer relación entre la información que se busca obtener y la encontrada en las bases. Entre los aspectos revisados para definir la pertinencia de los resultados de búsqueda y el contenido en los medios virtuales, estuvieron la operatividad, funcionalidad y el campo académico de cada una, todo con el fin de lograr un grado máximo de afinidad. Teniendo en cuenta lo anterior, la identificación de estudios potenciales se realizó a través de las siguientes bases de

datos: Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Por último, se incluyeron solo artículos cuya disponibilidad fuera completa y estuviera publicado en una revista indexada.

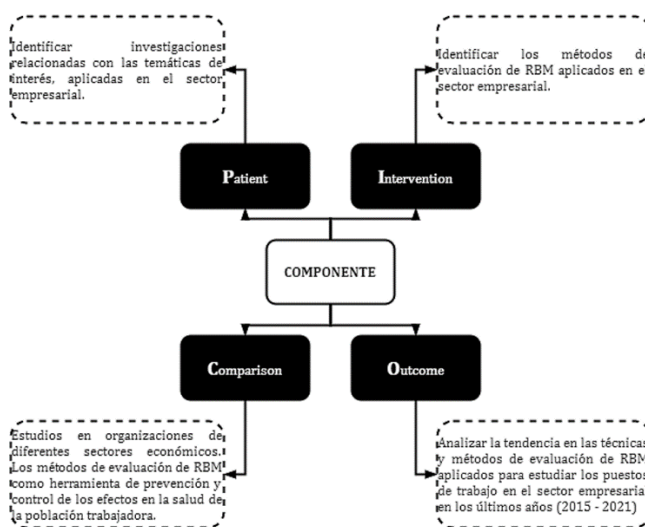


Figura 1. Detalle de los componentes del sistema PICO para el objeto de estudio (adaptado de [19])

En cuanto a las estrategias de búsqueda, se escogieron las tres bases de datos mencionadas anteriormente como fuente de información, dado que son reconocidas como fuentes con un amplio contenido de publicaciones científicas cuya configuración permite realizar una búsqueda más dirigida y facilita la búsqueda de información a través de las ecuaciones. Se realizaron varios pilotos de las estrategias de búsqueda con las bases de datos elegidas, tomando como punto de partida a la base de Scopus. Posteriormente cada uno de estos se fue refinando en los parámetros correspondientes a los términos de búsqueda para encontrar un ajuste a los resultados de información esperada. En ese orden de ideas, se utilizó palabras clave con el propósito de establecer una ecuación de búsqueda, para lo cual se incluyeron nombres propios, metodologías, objetos de estudio y marco de investigación. Para ello no se discrimino en el uso de palabras claves sencillas y compuestas.

En la Tabla 1 se relacionan las ecuaciones de búsqueda las cuales se aplicaron en cada una de las bases de datos consultadas. Igualmente, se indica la cantidad de resultado tamizados por cada una, analizando que las ecuaciones "Ergonomic Risk" AND Assessment y "Ergonomic Risk" AND Evaluation fueron los criterios de búsqueda que obtuvieron una mayor cantidad de documentos encontrados, en relación con las demás ecuaciones utilizadas. En esta fase preliminar de búsqueda, fue posible notar que ScienceDirect, es la base de datos que muestra una mayor cantidad de resultados en cada una de las ecuaciones utilizadas, respecto a las otras dos bases de datos.

Tabla 1. Comparativo base de datos y ecuación de búsqueda

Ecuaciones de Búsqueda	Scopus	Web of Science	ScienceDirect
"Biomechanical Risk" AND Assessment	10	24	33
"Biomechanical Risk" AND Evaluation	25	11	39
"Ergonomic Risk" AND Assessment	100	68	105
"Ergonomic Risk" AND Evaluation	39	30	113
"Postural Risk" AND Evaluation	5	10	16
"Manual Material handling" AND Evaluation	10	44	54
"Repetitive upper limb movement" AND Evaluation	9	2	3
"Repetitive movement" AND Evaluation	22	34	41

2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Con el propósito de depurar y delimitar los resultados de la búsqueda, se utilizaron operadores específicos. Para tal fin se recurrió al uso de símbolos como comillas y paréntesis con el fin de disminuir ambigüedades lo máximo posible. Los criterios de inclusión y exclusión que se contemplaron dentro de esta investigación se evidencian en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión para tamizaje de información

Criterio de Exclusión		Criterio de Inclusión	
Acceso	All Open Access	Idiomas	All
Años de consulta	2015 - 2021	Países	All
Estado de Publicación	Final	Palabras Clave	All

El periodo establecido para la búsqueda se desarrolló entre marzo a mayo de 2021. Los documentos obtenidos en la búsqueda se extraen en formato Research Information System RIS, para posteriormente ser citados e integrados en el Administrador de Bibliografía Mendeley®. En el caso de resultados de búsqueda duplicados en las tres bases de datos, se procedió a identificarlos y eliminarlos para evitar elementos duplicados. Se utilizó la herramienta Microsoft® Excel para sintetizar, clasificar y generar análisis de la información obtenida y así sustentar las conclusiones.

Para tamizar la información, se adoptó la metodología Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses PRISMA, la cual se ha concebido como una herramienta para contribuir a mejorar la claridad y la transparencia en la publicación de revisiones sistemáticas [18]. Por lo anterior, en la Figura 2. se establece el flujo de tamizaje establecido para el desarrollo de la investigación.

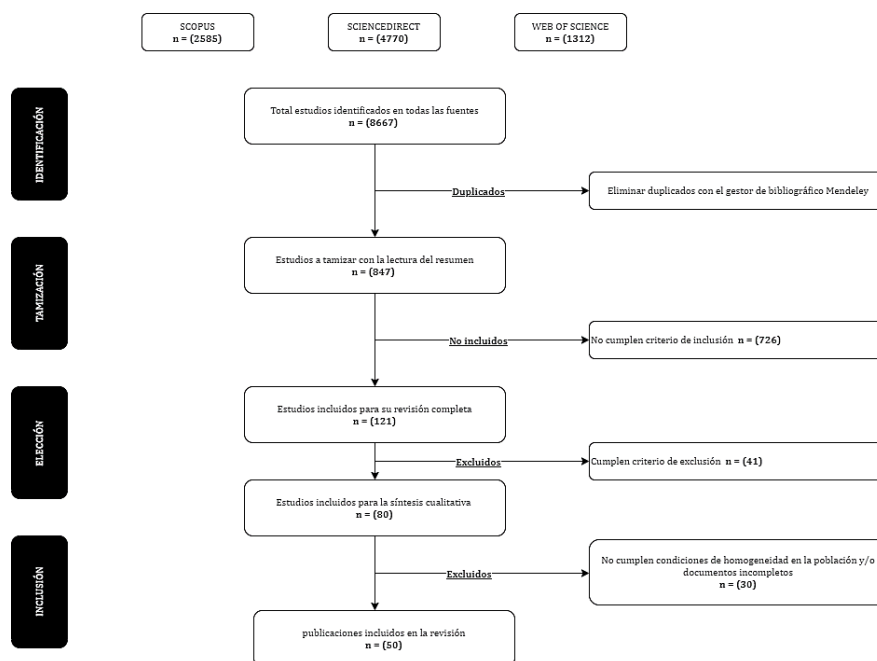


Figura 2. Adaptación del enfoque PRIMA

El algoritmo de selección de artículos de PRISMA consta de los siguientes segmentos, Identificación, Tamización, Elección e Inclusión de estudios, dentro del cual hay un proceso de depuración que de acuerdo con los criterios de exclusión e inclusión son eliminados y/o incluidos en la revisión. Para esta investigación, se identificaron inicialmente con los parámetros establecidos 8667 artículos de las bases de datos, de los cuales una vez realizado el filtro como se muestra en el diagrama, se consideraron 50 artículos pertinentes para la construcción del presente estudio.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de la revisión de la literatura se realizó una minuciosa selección de cincuenta (50) artículos extraídos directamente de Scopus, Science Direct y Web of Science, relacionados a tres factores de RBM ordenados en manipulación manual y esfuerzos, movimientos repetitivos y postura. La Tabla 3 presenta la información de los métodos de evaluación encontrados y clasificados por factor de RBM, actividad económica en donde se evaluó, categoría del método de evaluación (auto-reporte, observacional o medición directa), el método de evaluación, el país donde se realizó el estudio, el año de publicación y su respectiva referencia. Es importante resaltar que en un artículo pueden haber 2 o más categorías o factores de RBM a evaluar, es por eso por lo que la suma de estas categorías es 70 y no 50.

Tabla 3. Información de los artículos extraídos para análisis

Factor de RBM	Actividad Económica	Categoría método de Evaluación	Método de evaluación	País	Año	Ref.
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Observacional	NIOSH	India	2021	[21]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Observacional	INSHT	Canadá	2018	[22]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Observacional	NIOSH	Italia	2021	[23]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Medición Directa	Sensores portátiles IMU	Italia	2021	[23]
Manipulación Manual y esfuerzos	Agricultura	Observacional	INSHT	España	2019	[24]
Manipulación Manual y esfuerzos	Agricultura	Medición Directa	Sensor de fuerza digital SH-500	Israel	2016	[25]
Manipulación Manual y esfuerzos	Agricultura	Observacional	NIOSH	Israel	2016	[25]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Medición Directa	Red de sensores portátiles (WSN) y de electromiografía	Italia	2020	[26]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Auto-reporte	Cuestionario	Israel	2019	[27]
Manipulación Manual y esfuerzos	Supermercado	Medición Directa	SEMG	Dinamarca	2020	[28]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Observacional	FINE	Ecuador	2019	[29]
Manipulación Manual y esfuerzos	Educación	Observacional	INSHT	Ecuador	2018	[30]
Manipulación Manual y esfuerzos	Ganadería	Observacional	Strain Index	Italia	2020	[31]
Manipulación Manual y esfuerzos	Construcción	Medición Directa	sEMG	China	2017	[32]
Manipulación Manual y esfuerzos	Transporte	Auto-reporte	Cuestionario	Canadá	2020	[33]
Manipulación Manual y esfuerzos	Educación	Auto-reporte	NTC-5693-1 /NTC 5649:2008	Colombia	2017	[34]
Manipulación Manual y esfuerzos	Salud	Auto-reporte	Cuestionario	España	2017	[35]
Manipulación Manual y esfuerzos	Salud	Medición Directa	Dinamometría	Canadá	2015	[36]
Manipulación Manual y esfuerzos	Industrial	Auto-reporte	Matriz GTC-45	Colombia	2016	[37]
Manipulación Manual y esfuerzos	Metalmecánico	Auto-reporte	Guía DÉPARIS	Colombia	2020	[38]
Movimientos Repetitivos	Metalúrgico	Observacional	OCRA	Ecuador	2018	[39]
Movimientos Repetitivos	Metalúrgico	Observacional	Matriz GTC-45	Ecuador	2018	[39]
Movimientos Repetitivos	Industrial	Observacional	OCRA	Ecuador	2019	[29]
Movimientos Repetitivos	Construcción	Observacional	OCRA	Suecia	2020	[40]
Movimientos Repetitivos	Manufactura	Observacional	OCRA	Italia	2017	[41]
Movimientos Repetitivos	Limpieza	Auto-reporte	Cuestionario NÓRDICO	India	2019	[42]
Movimientos Repetitivos	Limpieza	Observacional	OCRA/JSI	Italia	2017	[43]
Movimientos Repetitivos	Manufactura	Observacional	JSI	Sri Lanka	2019	[44]
Movimientos Repetitivos	Industrial	Medición Directa	Sensor Biopac MP150	China	2020	[45]
Postura	Metalmecánico	Observacional	LEST / REBA	Colombia	2020	[46]
Postura	Industrial	Medición Directa	Sensores portátiles IMU	Italia	2020	[47]
Postura	Educación	Observacional	REBA	Colombia	2019	[48]
Postura	Educación	Auto-reporte	Cuestionario NÓRDICO	Colombia	2016	[49]
Postura	Educación	Observacional	REBA	India	2020	[50]
Postura	Forestal	Observacional	REBA/RULA	Italia	2019	[51]
Postura	Forestal	Observacional	OWAS	Australia	2018	[52]
Postura	Metalúrgico	Observacional	Grabaciones	Indonesia	2021	[53]
Postura	Metalúrgico	Auto-reporte	Cuestionario	Indonesia	2021	[53]
Postura	Industrial	Observacional	REBA	Ecuador	2019	[29]
Postura	Procesamiento Cárnico	Observacional	REBA	Ecuador	2017	[54]
Postura	Minero	Auto-reporte	DMRA	México	2019	[55]
Postura	Manufactura	Observacional	RULA	Ecuador	2017	[56]
Postura	Manufactura	Observacional	FINE	Ecuador	2017	[56]
Postura	Manufactura	Observacional	OWAS/RULA	Perú	2018	[57]
Postura	Educación	Observacional	REBA	Ecuador	2018	[30]
Postura	Educación	Observacional	REBA	Colombia	2019	[58]
Postura	Manufactura	Observacional	RULA	Pakistán	2021	[59]
Postura	Salud	Observacional	REBA	Portugal	2021	[60]
Postura	Manufactura	Auto-reporte	Escala Borg	Italia	2017	[41]
Postura	Salud	Auto-reporte	Cuestionario	España	2017	[35]
Postura	Industrial	Observacional	REBA	Colombia	2016	[37]
Postura	Industrial	Observacional	OWAS	Colombia	2016	[37]
Postura	Limpieza	Observacional	RULA	India	2019	[42]
Postura	Salud	Auto-reporte	Cuestionario	Australia	2020	[61]
Postura	Salud	Observacional	REBA	Indonesia	2020	[62]
Postura	Salud	Observacional	RULA	Indonesia	2020	[62]
Postura	Tecnológico	Observacional	REBA/RULA	EE.UU.	2020	[63]
Postura	Manufactura	Medición Directa	Sensor Kinect V2	Italia	2020	[64]

Postura	Agricultura	Observacional	REBA	Israel	2016	[25]
Postura	Reciclaje	Auto-reporte	Cuestionario	Brasil	2021	[65]
Postura	Manufactura	Observacional	REBA	Sri Lanka	2019	[44]
Postura	Manufactura	Observacional	REBA/WERA	Indonesia	2020	[66]
Postura	Agricultura	Observacional	RULA/REBA/OWAS	Corea	2020	[67]
Postura	Educación	Observacional	REBA	Indonesia	2019	[68]
Postura	Educación	Auto-reporte	Mapa Corporal Nórdico	Indonesia	2019	[68]
Postura	Educación	Auto-reporte	Cuestionario de malestar musculoesquelético Cornell	Tailandia	2020	[69]
Postura	Educación	Observacional	REBA	Tailandia	2020	[69]
Postura	Salud	Auto-reporte	Cuestionarios	Alemania	2020	[70]
Postura	Salud	Medición Directa	Sensores Inerciales	Alemania	2020	[70]
Postura	Salud	Observacional	RULA	Alemania	2020	[70]

3.1 Métodos de evaluación de RBM según categoría

Se encontró que, de los 50 estudios, 17 son Auto-reportes, 10 de Medición Directa y 43 observacionales.

- Auto-reporte:** los trabajadores emiten un reporte a partir de una autoevaluación a los encargados, puede ser a través de cuestionarios estandarizados y no estandarizados (8 artículos), cuestionarios nórdicos (2 artículos), Escala Borg (1 artículo), Mapas Corporales (1 artículo), Cuestionario Cornell (1 artículo), Aplicaciones de normas como la NTC-5693-1 (1 artículo) o guía DÉPARIS (1 artículo). Como se mencionó anteriormente, para esta categoría el método más implementado para evaluar los RBM fueron los cuestionarios principalmente en el factor de postura. Los mencionados anteriormente, son métodos de evaluación de fácil implementación para los evaluadores, sin embargo, dado que las herramientas son reportadas por los trabajadores, el análisis de estos reportes demanda una alta exigencia ya que existe el riesgo que los encuestados sesguen la información debido a que el nivel de percepción en términos de gravedad pueda ser diferente a quienes conocen el adecuado manejo de Posturas, Movimientos Repetitivos o Manipulación manual.
- Observacional:** La mayoría de las revisiones se ejecutaron con base en métodos de evaluación categorizados como observacionales (Figura 3), entre ellos están los más comunes y los más conocidos como: NIOSH (3 artículos), REBA (17 artículos), RULA (9 artículos), OWAS (4 artículos), LEST (1 artículo), Check List OCRA (5 artículos), WERA (1 artículo), FINE (2 artículos), INSHT (3 artículos), Matriz GT-45 (1 artículo) o Strain Index (1 artículo). La evaluación de cualquiera de estos métodos puede llegar a suponer una dificultad si no son personas expertas quienes lo implementan, debido a la alta similitud entre ellos es fácil confundirlos y conducir a un errado procedimiento de evaluación.
- Medición Directa:** En esta categoría los participantes son sometidos a interacciones con algunos elementos como sensores portátiles (4 artículos), Dinamometría (1 artículo), Sensores inerciales (1 artículo), sensores de fuerza (1 artículo) y sensores de electromiografía (2 artículos). Esta categoría principalmente se usa para evaluaciones de los factores de postura y manipulación manual (Figura 3) en los que se usan varios tipos de sensores. Los elementos que componen esta categoría pueden ser más precisos que los otros, sin embargo, el alcance de los evaluadores puede resultar más difícil debido al costo adicional que se pagaría por los instrumentos de medición, e incluso podría incluir temas de manejos técnicos.

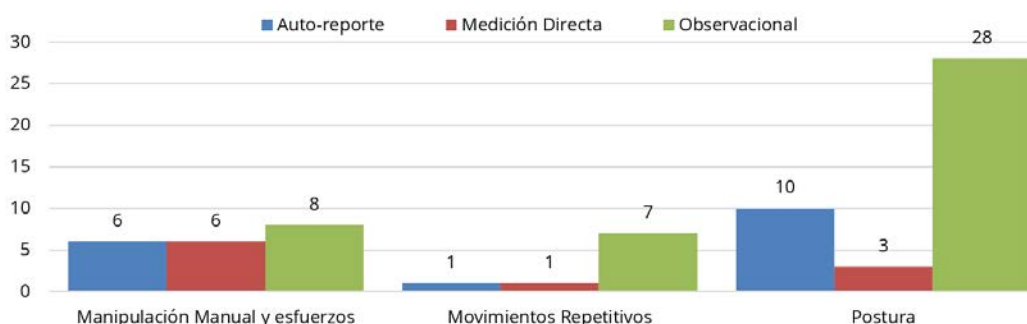


Figura 3. Categoría del método de evaluación vs factor de RBM

De acuerdo con la implementación de las tres categorías es válido mencionar que: si la muestra de los participantes es de un número elevado generalmente se usan técnicas de auto-reporte ya que agiliza el trabajo de los evaluadores y se tienen resultados acertados; si el número de participantes es reducido, comúnmente se hace una combinación entre técnicas observacionales y de medición directa, ya que el tiempo que se emplee en la medición no será tan extenso como en una muestra numerosa y así se puede garantizar una evaluación detallada del riesgo que se esté evaluando; y si, en caso de que el o los evaluadores no puedan tener una comunicación o relación directa con los trabajadores se puede emplear la técnica observacional para ejecutar la evaluación de RBM.

La Figura 4 relaciona la cantidad de artículos revisados de cada factor de RBM por el aporte de las categorías de métodos de evaluación. La manipulación manual y esfuerzos tiene un aporte de 28,57% en el número de revisiones respecto al total con la categoría medición directa como la más usada en este factor. Por otro lado, el factor de RBM movimientos repetitivos es el que tuvo el menor aporte con 12,86% usando en su mayoría métodos categorizados como observacionales. Finalmente, el RBM de postura complementa el aporte de artículos revisados con un 58,57% del total, así mismo la categoría que muestra prevalencia en estos estudios es la observacional.

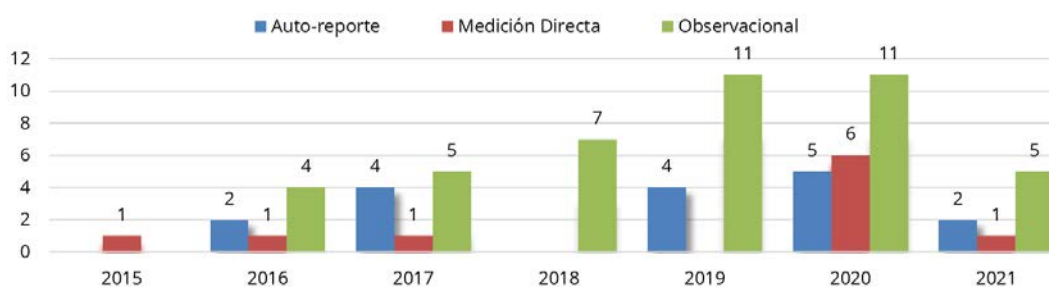


Figura 4. Categoría del método de evaluación vs año de publicación

De forma general, se evidenció una tendencia incremental hacia los métodos observacionales durante los años 2016 a 2020, sin embargo, se está presentando una decadencia en el transcurso de 2021, hasta el momento con el mismo número de artículos que en el 2017. La evolución de los métodos de medición directa no se llegó a evidenciar sino hasta el año 2020, luego de una ausencia por 2 años consecutivos (2018 y 2019), así mismo, esta categoría fue la única que presentó un artículo durante el año 2015 que en consecuencia es el más antiguo. El comportamiento de los métodos de auto-reporte presenta un patrón no muy disperso ya que el número de publicaciones en cada año no varía significativamente respecto a los demás, únicamente excluyendo el año 2018 que sólo evaluó métodos observacionales.

3.2 Métodos de evaluación de RBM según factor de riesgo

Los RBM para esta revisión se dividieron en 3 categorías que se contemplan de la siguiente manera:

1. *Postura*: Las técnicas de trabajo y las posturas corporales utilizadas durante las actividades laborales pueden conducir a RBM de alto nivel asociados con resultados de salud negativos, así como aumento de dolor lumbar y piernas, fatiga física y malestar musculoesquelético. El enfoque de esta categoría implica métodos de evaluación para este factor, uno de los más comunes y utilizados fue REBA ya que este método permite analizar las posiciones adoptadas por los miembros superiores, región cervical, tronco y miembros inferiores, además, a través de este método es posible evaluar qué segmentos corporales son más exigentes en determinadas tareas y cuáles son las situaciones más dolorosas.
2. *Manipulación manual de carga y esfuerzos*: La evaluación RBM de levantamiento de cargas, permite identificar los factores de riesgo durante la manipulación de cargas, que incrementan la probabilidad de desarrollar un TME. En los estudios seleccionados que evalúan este factor el método más implementado es la guía INSHT (3 artículos) que cuenta con un software que permite evaluar este factor de riesgo, de una manera más dinámica, ágil y de fácil entendimiento. El registro de estos estudios tuvo participación en cada uno de los años que se evaluaron.

3. *Movimientos repetitivos*: La mayor parte de los TME por movimientos repetitivos aparecen gradualmente tras largos periodos de exposición a unas condiciones de trabajo demasiado exigentes. El método Check List OCRA permite, con menos esfuerzo, obtener un resultado básico de valoración del riesgo por movimientos repetitivos de los miembros superiores, previniendo sobre la urgencia de realizar estudios más detallados. De los 8 artículos de esta categoría, 3 de ellos se evaluaron mediante el Check List Ocra, el año de publicación de los estudios presenta un patrón de distribución mínimo de artículos durante 2017 a 2020 (Figura 5).



Figura 5. Factor de RBM vs Año de publicación

La mayoría de los artículos seleccionados pertenecen a la evaluación de Postura (33 estudios en total) los cuales tuvieron mayor participación en cada uno de los años de publicación, excluyendo el año 2015 que solo se seleccionó 1 artículo referente manipulación manual y esfuerzo. De la muestra de artículos seleccionados, 22 fueron publicados en el 2020, 15 de estos evalúan postura, 5 evalúan manipulación manual y los 2 restantes pertenecen a movimientos repetitivos. La revisión de manera general tuvo una menor focalización en el factor de movimientos repetitivos ya que sólo evaluó 9 artículos de los 50 que se revisaron (Figura 6).

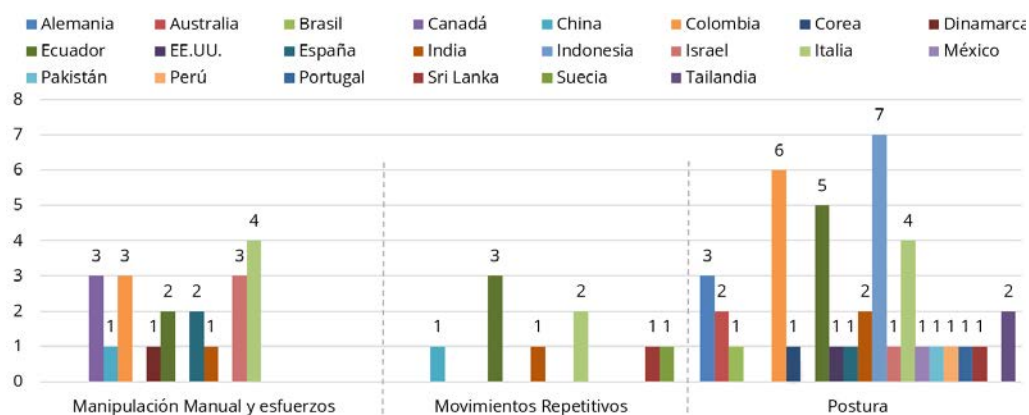


Figura 6. País vs Factor de RBM

A partir de la búsqueda de los 50 artículos para revisión se obtuvo un listado de países en los que se realizaron dichos estudios, en el factor movimientos repetitivos hubo una participación de 6 países en el que predomina Ecuador dado que tiene mayor número de artículos realizados allí. En el factor de Postura participaron 18 países, siendo Indonesia y Colombia donde más se realizaron estudios para este RBM. Y para el factor de manipulación manual hubo una participación de 9 países teniendo a Italia como la nación más contribuyente en los artículos revisados.

En resumen, los países que tuvieron mayor participación dentro de los 50 artículos fueron Italia (10 artículos), Ecuador (10 artículos) y Colombia (9 artículos), que en su mayoría pertenecen al factor de postura posicionando este último como la categoría más participativa en los elementos evaluados.

3.3 Evaluación de RBM según actividad económica

Los trabajadores de diversos sectores de la manufactura, la construcción, la agricultura, etc. y que utilizan sus manos desnudas para trabajar con herramientas, maquinarias y equipos de la vida diaria suelen ser

propensos a posturas incómodas, sobre extensiones, esfuerzos energéticos y movimientos repetitivos durante un período prolongado [42]. Por su lado, actividades laborales del sector servicios, como la educación, el transporte, la salud, entre otros, generalmente se caracterizan por ser sedentarias y realizarse en un puesto de trabajo fijo, representando un RBM por la demanda postural. La principal consecuencia de la exposición a RBM es el desarrollo de TMEs, considerados los problemas de salud de origen laboral con mayor prevalencia, estos trastornos abarcan signos y síntomas que afectan partes del cuerpo, como manos, cuello o espalda, al igual que diferentes estructuras anatómicas. Los trabajadores se convierten en parte esencial del proceso a realizar, de modo que, uno de los aspectos más relevantes en relación con sus condiciones de trabajo, debe ser velar por la salud ergonómica y así asegurar el mejor desempeño de sus labores [48].

En la revisión de 50 artículos, las intervenciones de evaluación de riesgos biomecánicos se llevan a cabo en 18 actividades económicas como las evidenciados en la gráfica 5. El mayor porcentaje de estudios (20%) se realiza en el sector industrial, la contribución del sector de educación es de 15,71%, seguido por el sector salud y manufactura por 14,29% cada una y luego está el de la agricultura con 7,14%. Las demás actividades económicas involucradas en la revisión contribuyen con el 28,59% restante (Figura 7).

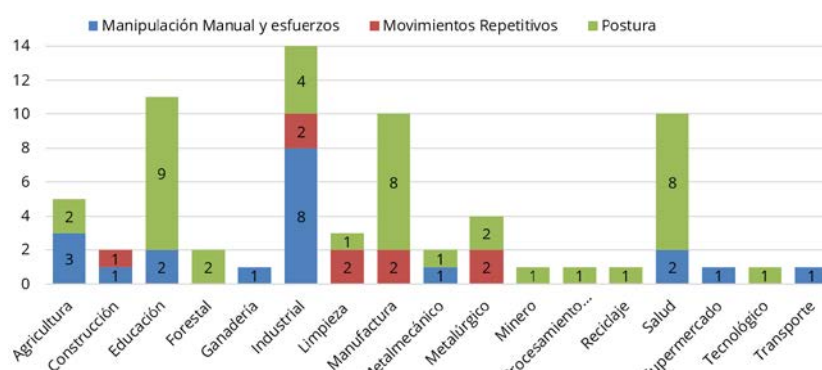


Figura 7. Factor de RBM vs actividad económica

A continuación, se detalla el análisis realizado de RBM y sus métodos de evaluación por las actividades económicas más destacadas:

- **Agricultura:** Las lesiones musculoesqueléticas son frecuentes en los procesos de trabajo manual en la agricultura por la exigencia biomecánica del trabajo [25]. La literatura consultada evidenció que en este sector se aplicaron dos de las tres categorías de métodos de evaluación de RBM: observacionales (4 artículos) y medición directa (1 artículo). Las metodologías aplicadas para el análisis de esta actividad fueron: OWAS, RULA y REBA para la evaluación postural, NIOSH y Guía INSHT para manipulación manual de cargas, y sensor de fuerza SH-500 para esfuerzos.
- **Construcción:** Dentro de la práctica de la construcción hay una alta exigencia de posturas forzadas, especialmente de la espalda, por la realización de labores en diferentes alturas del plano de trabajo, acompañada por la manipulación manual de cargas [32]. Los métodos para evaluar la exposición a estos RBM incluyeron las categorías: observacional (1 artículos) y medición directa (1 artículo). Se consideró la evaluación de la exposición a movimientos repetitivos de miembro superior a través de la aplicación del método OCRA y la evaluación de las tareas repetitivas de levantamiento y manipulación de cargas con la aplicación de electromiografía de superficie (sEMG).
- **Educación:** Uno de los RBM más comúnmente asociados a la aparición de trastornos musculoesqueléticos es la excesiva carga postural. En esta actividad económica se encontraron estudios que evalúan el RBM mediante la aplicación de métodos observacionales como el método REBA (6 artículos) para evaluación postural y guía INSHT (1 artículo) para manipulación manual de cargas. Así mismo, se evidenció la aplicación de métodos de auto-reporte como el mapa nórdico (2 artículos), NTC-5693-1 /NTC 5649:2008 (1 artículo) y cuestionario Cornell (1 artículo). No se evidenciaron artículos donde se aplicaron métodos de medición directa.

- *Industrial:* Al analizar la situación de las condiciones de trabajo en las industrias, se obtuvo que 2 artículos abarcan el factor movimientos repetitivos, 4 artículos la evaluación postural y 8 artículos se concentraron en analizar tareas con manipulación manual de cargas. La identificación y evaluación de RBM a los que están expuestos los trabajadores en el área de producción se realizó con métodos conocidos, principalmente categorizados en auto-reporte (2 artículo), observacionales (8 artículos) y de medición directa (4 artículos). Para la evaluación postural se aplicaron los métodos REBA, OWAS y sensores portátiles IMU. El análisis de la exposición de movimientos repetitivos se realizó por medio de Check List OCRA y sensor portátil Biopac MP150. Así mismo, para la evaluación de manipulación manual se incluyeron métodos como FINE, NIOSH, Matriz GTC-45. Los métodos aplicados en esta actividad pretendieron determinar los ciclos de trabajo, la postura adecuada (si era el caso), revisiones para determinar dónde se debían aplicar correcciones, rediseño del puesto de trabajo si era necesario y comprobar efectividad de mejoras implementadas [29]. La manipulación manual de materiales en la actividad industrial es una de las tareas de trabajo riesgosas que pueden conducir a problemas de salud, los estudios de este apartado muestran que los participantes tenían altos niveles de problemas ergonómicos debido a tareas como levantar, bajar, empujar, halar y cualquier actividad que genera vibraciones, la razón se debe a la inexperiencia y poco conocimiento de los trabajadores.
- *Limpieza:* Las tareas de limpieza implican movimientos repetitivos en posturas corporales incómodas lo cual justifican dolor en las partes del cuerpo expuestas, información corroborada en los 2 artículos relacionados a esta actividad, los cuales se evaluaron con Cuestionarios Nórdicos, Check List OCRA, Check List JSI y el tradicional RULA observacional.
- *Manufactura:* Los trabajadores en zonas manufactureras se dedican a operaciones en las que deben mantenerse de pie durante la mayoría de las horas de trabajo, lo que conduce a molestias y TME. Los estudios demostraron que la mayor ocurrencia de los síntomas se presentaba en piernas y espalda representando niveles de riesgo alto y muy alto de aparición de TME. La evaluación de RBM se realizó a partir de métodos observacionales como RULA (3 artículos), OWAS (1 artículo), OCRA (1 artículo), REBA (2 artículos) y WERA (1 artículo), y con métodos de medición directa como el sensor Kinect V2 (1 artículo).
- *Metalúrgica:* Las actividades de fundición de metales se clasifican como trabajo pesado, se realiza de forma continua aumentando el riesgo de fracturas o desgaste muscular; las herramientas comúnmente utilizadas para valorar estos riesgos no cumplen con los estándares apropiados y no están acompañados de los procedimientos operativos estándar dado que las mejoras que estas evaluaciones arrojan no son suficientes para resolver los problemas relacionados con las quejas físicas de los trabajadores, sin embargo se identificaron herramientas como OCRA, Matriz GTC-45 y cuestionarios que contribuyen a acciones que disminuyen las molestias de los trabajadores. Estos métodos de evaluación abarcaron los dos factores de RBM, movimientos repetitivos (2 artículos) y postura (2 artículos).
- *Salud:* La prevalencia de TME en los profesionales del área de salud es alta, siendo las tareas de manipulación de pacientes una de las principales causas [60], estas tareas conducen a la adopción frecuente de posturas inapropiadas a nivel del tronco en flexión e inclinación, así como esfuerzos de Manipulación Manual. Para la evaluación de la carga postural se usaron métodos como REBA (2 artículos), Cuestionarios (3 artículos), RULA (2 artículos), sensores inerciales (1 artículo). Para la valoración de las tareas de manipulación manual de carga y esfuerzo se usaron cuestionarios (1 artículo) y dinamometría (1 artículo).

4. CONCLUSIONES

Se analizaron los resultados de las categorías de evaluación de RBM: observación, medición directa y auto-reporte donde se puede determinar que los diversos métodos de evaluación de RBM hacen posible identificar y evaluar los factores de riesgo presentes en los lugares de trabajo con el fin de presentar opciones de rediseño para reducir el riesgo a un nivel aceptable para los trabajadores en cuanto a postura, movimiento repetitivo y manipulación manual y que a su vez estos son fáciles de entender y aplicar en el contexto empresarial.

La aplicación de técnicas de evaluación de RBM se ha realizado en una variedad de actividades económicas, de las cuales se evidenció mayor interés en sectores como la educación, el industrial, la manufactura y de salud. Comparando los resultados de cada factor, se encontró que los métodos más utilizados para evaluar la postura fueron REBA y OWAS. Para la evaluación de la manipulación manual y esfuerzos los métodos más representativos fueron NIOSH y la guía INSHT. Por último, en el factor de movimientos repetitivos se destacó en su mayoría la aplicación del método OCRA.

El análisis realizado a los artículos en esta revisión se evidencia que hay pocos instrumentos que promueven el uso de tecnologías portátiles para la evaluación de RBM.

La categoría que mostró mayor prevalencia en los estudios analizados fue observacional, lo que quiere decir que en cada factor de RBM esta categoría fue más implementada en comparación a medición directa y auto-reporte.

Los estudios extraídos se examinaron a fondo donde se encontró que la mayoría de los estudios se focalizaron en analizar un solo factor de RBM, muy pocos combinaron evaluación de 2 o más factores.

REFERENCIAS

- [1] M. Cataño I. et al., "Riesgo biomecánico por carga estática y morbilidad sentida en docentes universitarios, Medellín 2018," *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 17, no. 3, p. 48, 2019.
- [2] M. Ramaganesh, R. Jayasuriyan, T. Rajpradeesh, S. Bathrinath, and R. Manikandan, "Ergonomics hazard analysis techniques- A technical review," *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [3] Fundación para la prevención de riesgos laborales, "Factores de riesgo ergonómico y causas de exposición," 2015, Recuperado: <http://hdl.handle.net/11232/1184>
- [4] N. A. Moreno Suescún, Brenda Lizeth; Espitia Falla, "Cartilla de prevención del riesgo biomecánico en personas de mantenimiento y servicios generales de la Fundación Universitaria UNINPAHU.," Universidad Minuto de Dios, 2018, Recuperado: <http://hdl.handle.net/10656/6047>
- [5] G. Naik and M. R. Khan, "Prevalence of MSDs and Postural Risk Assessment in Floor Mopping Activity Through Subjective and Objective Measures," *Safety and Health at Work*, vol. 11, no. 1, pp. 80–87, Mar. 2020.
- [6] Diego-Mas, Jose Antonio. "Evaluación del riesgo por movimientos repetitivos mediante el Check List Ocra. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia", 2015. Recuperado: <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/ocra/ocra-ayuda.php>
- [7] Martínez-Soto, T. y Estrada-Fonseca, M. I. Evaluación de los factores de riesgo ergonómico en puestos de trabajo. *Revista de Operaciones Tecnológicas*, 19–23. 2019.
- [4] E. H. Sukadarin, B. M. Deros, J. A. Ghani, N. S. Mohd Nawawi, and A. R. Ismail, "Postural assessment in pen-and-paper-based observational methods and their associated health effects: a review," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 22, no. 3, pp. 389–398, Jul. 2016.
- [3] J. Delclòs et al., "Identificación de los riesgos laborales asociados a enfermedad sospechosa de posible origen laboral atendida en el Sistema Nacional de Salud," *Atención Primaria*, vol. 44, no. 10, pp. 611–627, Oct. 2012.
- [10] A. Lindenmann, M. Uhl, T. Gwosch, and S. Matthiesen, "The influence of human interaction on the vibration of hand-held human-machine systems – The effect of body posture, feed force, and gripping forces on the vibration of hammer drills," *Applied Ergonomics*, vol. 95, p. 103430, Sep. 2021.
- [11] M. Arip; D. Wike; L. Risky. "Work Posture Analysis of Manual Material Handling Using OWAS Method" 2015
- [12] H. Liu; Y. Cheng; J. Ho. "Associations of ergonomic and psychosocial work hazards with musculoskeletal disorders of specific body parts: A study of general employees in Taiwan ", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2020.
- [13] M. Gómez; A. Callejon; J. Perez, N. Diaz; A. Carrillo, "Musculoskeletal Risks: RULA Bibliometric Review." *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17(12), 4354.
- [14] D. Kee, Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders." *International Journal of Industrial Ergonomics* 2021.
- [15] C. Lins; S. Fudickar; A. Hein. "OWAS inter-rater reliability". *Applied Ergonomics*. 2021.
- [16] Spielholz, P. (2006). Calibrating Borg scale ratings of hand force exertion. *ScienceDirect*, 37(5).
- [17] L. Donisi, G. Cesarelli, A. Coccia, M. Panigazzi, E. M. Capodaglio, and G. D'Addio, "Work-Related Risk Assessment According to the Revised NIOSH Lifting Equation: A Preliminary Study Using a Wearable Inertial Sensor and Machine Learning," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2593, Apr. 2021.
- [18] G. Robleda, "Structured question to generate search for a systematic review" *Rev Enfermería Intensiva*, vol 30, no. 3, pp 144-147, 2019.

- [19] C. Schardt, M. Adams, T. Owens, S. Keitz, and P. Fontelo, "Utilization of the PICO framework of improve searching PubMed for clinical question," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 7, p. 16, 2007.
- [20] E. Landa-Ramírez, A. De, and J. Arredondo-Pantaleón, "Herramienta pico para la formulación y búsqueda de preguntas clínicamente relevantes en la psicooncología basada en la evidencia," *Psicooncología*, vol. 11, pp. 259–270, 2014.
- [21] M. Rajendran, A. Sajeev, R. Shanmugavel, and T. Rajpradeesh, "Ergonomic evaluation of workers during manual material handling," *Materials Today: Proceedings*, Mar. 2021.
- [22] P. Corbeil *et al.*, "Biomechanical analysis of manual material handling movement in healthy weight and obese workers," *Applied Ergonomics*, vol. 74, pp. 124–133, Jan. 2019.
- [23] L. Donisi, G. Cesarelli, A. Coccia, M. Panigazzi, E. M. Capodaglio, and G. D'Addio, "Work-Related Risk Assessment According to the Revised NIOSH Lifting Equation: A Preliminary Study Using a Wearable Inertial Sensor and Machine Learning," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2593, Apr. 2021.
- [24] V. Zorrilla-Muñoz, T. García-Sedano, and M. S. Agulló-Tomás, "Análisis socio-ergonómico en la agricultura. Evaluación del sector oleico desde una perspectiva de género y envejecimiento," *Informacion Tecnica Economica Agraria*, Mar. 2019.
- [25] R. Riemer and A. Bechar, "Investigation of productivity enhancement and biomechanical risks in greenhouse crops," *Biosystems Engineering*, vol. 147, pp. 39–50, Jul. 2016.
- [26] P. Giannini, G. Bassani, C. A. Avizzano, and A. Filippeschi, "Wearable Sensor Network for Biomechanical Overload Assessment in Manual Material Handling," *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 3877, Jul. 2020.
- [27] Y. Harari, A. Bechar, and R. Riemer, "Workers' biomechanical loads and kinematics during multiple-task manual material handling," *Applied Ergonomics*, vol. 83, p. 102985, Feb. 2020.
- [28] S. Skals, R. Bláfoss, M. S. Andersen, M. de Zee, and L. L. Andersen, "Manual material handling in the supermarket sector. Part 1: Joint angles and muscle activity of trapezius descendens and erector spinae longissimus," *Applied Ergonomics*, vol. 92, p. 103340, Apr. 2021.
- [29] G. L. Tuttillo Andrade, "Gestión técnica de seguridad y salud ocupacional en el área de producción de la empresa editores MMA asociados CIA LTDA," *B.S. Thesis*, 2019. Recuperado: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9199>
- [30] D. E. E. Quezada, "Identificación de Riesgos Mecánicos y Ergonómicos en la práctica del CrossFit," *Universidad de Cuenca*, 2018, Recuperado: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31283/1/Trabajode Titulacion.pdf>
- [31] F. Masci *et al.*, "Personal and occupational factors contributing to biomechanical risk of the distal upper limb among dairy workers in the Lombardy region of Italy," *Applied Ergonomics*, vol. 83, p. 102796, Feb. 2020.
- [32] M. F. Antwi-Afari, H. Li, D. J. Edwards, E. A. Pärn, J. Seo, and A. Y. L. Wong, "Biomechanical analysis of risk factors for work-related musculoskeletal disorders during repetitive lifting task in construction workers," *Automation in Construction*, vol. 83, pp. 41–47, Nov. 2017.
- [33] F. Sekkay *et al.*, "Assessment of physical work demand of short distance industrial gas delivery truck drivers," *Applied Ergonomics*, vol. 89, p. 103222, Nov. 2020.
- [34] M. C. Acevedo, "Estudio de riesgo ergonómico por manipulación manual de cargas en los docentes de la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de Colombia," *Universidad Católica de Colombia*, p. 60, 2017.
- [35] S. Malca Sandoval, "Trastornos musculoesqueléticos de origen laboral en el cuello y las extremidades superiores de los fisioterapeutas en Cataluña," *Universitat de Lleida. Departament d'Infermeria*, p. 354, 2017, Recuperado: <https://www.tdx.cat/handle/10803/420862#page=1>
- [36] J. Prairie, A. Plamondon, S. Hegg-Deloye, D. Larouche, and P. Corbeil, "Biomechanical risk assessment during field loading of hydraulic stretchers into ambulances," *Intern. Journal of Industrial Ergo.*, vol. 54, pp. 1–9, Jul. 2016.
- [37] O. Y. Sánchez Piza, "Mitigación de riesgos asociados con la actividad de descargue de cerámica en el sector de Santa Lucía," *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [38] H. R. Espacios, L. O. S. Autores, L. Yuber, G. Rafael, and O. Oscar, "Relación entre las condiciones de trabajo y la salud musculoesquelética de los trabajadores del sector metalmecánico de Bogotá para la gestión de riesgos laborales," *Espacios*, 2020, Recuperado: <http://www.1.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p17.pdf>
- [39] P. E. Ron and P. A. T. Fierro, "Análisis de los factores de riesgo laboral y plan mínimo de los trabajadores de la empresa Sotein y su incidencia en la seguridad de los puestos de trabajo," *Universidad Tecnológica Indoamérica*, vol. 2, no. 2018–05, p. 120, 2018.
- [40] I.-M. Rhén and M. Forsman, "Inter- and intra-rater reliability of the OCRA checklist method in video-recorded manual work tasks," *Applied Ergonomics*, vol. 84, p. 103025, Apr. 2020.
- [41] J. Rosecrance, R. Paulsen, and L. Murgia, "Risk assessment of cheese processing tasks using the Strain Index and OCRA Checklist," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 61, pp. 142–148, Sep. 2017.
- [42] G. Naik and M. R. Khan, "Prevalence of MSDs and Postural Risk Assessment in Floor Mopping Activity Through Subjective and Objective Measures," *Safety and Health at Work*, vol. 11, no. 1, pp. 80–87, Mar. 2020.
- [43] J. Rosecrance, R. Paulsen, and L. Murgia, "Risk assessment of cheese processing tasks using the Strain Index and OCRA Checklist," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 61, pp. 142–148, Sep. 2017.

- [44] T. Sakthi Nagaraj, R. Jeyapaul, and K. Mathiyazhagan, "Evaluation of ergonomic working conditions among standing sewing machine operators in Sri Lanka," *Intern. Journal of Industrial Ergo.*, vol. 70, pp. 70–83, Mar. 2019.
- [45] F. Guo, L. Liu, and W. Lv, "Biomechanical analysis of upper trapezius, erector spinae and brachioradialis fatigue in repetitive manual packaging tasks: Evidence from Chinese express industry workers," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 80, p. 103012, Nov. 2020.
- [46] E. R. Medina, "Evaluation of disergonomic risks in small and medium-size enterprises (SMEs) in Bogotá," *DYNA*, vol. 87, no. 213, pp. 98–104, Apr. 2020.
- [47] I. Conforti, I. Mileti, Z. del Prete, and E. Palermo, "Measuring Biomechanical Risk in Lifting Load Tasks Through Wearable System and Machine-Learning Approach," *Sensors*, vol. 20, no. 6. 2020.
- [48] M. Cataño I. *et al.*, "Riesgo biomecánico por carga estática y morbilidad sentida en docentes universitarios, Medellín 2018," *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 17, no. 3, p. 48, Oct. 2019.
- [49] A. E. Dimate-García and D. C. Rodríguez-Romero, "Risk factors associated to musculoskeletal disorder perception in college students, Bogota, 2016," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 81, p. 103010, Jan. 2021.
- [50] G. Kar and A. Hedge, "Effects of a sit-stand-walk intervention on musculoskeletal discomfort, productivity, and perceived physical and mental fatigue, for computer-based work," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 78, p. 102983, Jul. 2020.
- [51] M. Micheletti Cremasco, A. Giustetto, F. Caffaro, A. Colantoni, E. Cavallo, and S. Grigolato, "Risk Assessment for Musculoskeletal Disorders in Forestry: A Comparison between RULA and REBA in the Manual Feeding of a Wood-Chipper," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 5, p. 793, Mar. 2019.
- [52] R. Spinelli, G. Aminti, N. Magagnotti, and F. de Francesco, "Postural Risk Assessment of Small-Scale Debarkers for Wooden Post Production," *Forests*, vol. 9, no. 3, p. 111, Mar. 2018.
- [53] W. Susihono and I. P. G. Adiatmika, "The effects of ergonomic intervention on the musculoskeletal complaints and fatigue experienced by workers in the traditional metal casting industry," *Heliyon*, vol. 7, no. 2, p. e06171, Feb. 2021.
- [54] M. A. Cardenas Astudillo and H. O. Montero Arteaga, "Gestión de riesgos mecánicos, ergonómicos y biológicos e implementación de señalética para el Centro de Faenamiento del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Francisco de Orellana.," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, p. 110, 2017, Recuperado: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6860>
- [55] C. R. Domínguez, I. V. Martínez, P. M. Piñón Peña, and A. Rodríguez Ochoa, "Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, no. 1, pp. 52–59, Feb. 2019.
- [56] K. L. Cerda Cruz, "Elaboración de un manual para la gestión de riesgos físicos-ambientales, mecánicos y ergonómicos en el área de talleres de la empresa automotores de la Sierra-assa Chevrolet, en la ciudad de Riobamba," *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [57] J. Moncada Lupú, "Aplicación de los métodos ergonómicos Owas y Rula para evaluar los desórdenes musculoesqueléticos (DME) presentes en los trabajadores del área del proceso de mantenimiento (enllante-desenllante) de automóviles taller El Rey –Piura 2018," *Repositorio Institucional - UCV*, 2018, Accessed: Jun. 03, 2021. Recuperado: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/42830#.YLI_3Elzpt8.mendeley
- [58] D. Duque Jiménez, "Medidas de control para riesgo biomecánico y morbilidad sentida en docentes de una institución educativa de la ciudad de Cali," *Universidad Autónoma de Occidente*, 2019, Recuperado: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10981/T08492.pdf;jsessionid=0375356C69CA6A9808EC13DE8CBBF076?sequence=5>
- [59] W. Mahmood, M. S. Bashir, S. Ehsan, and M. A. Qureshi, "Upper extremity musculoskeletal disorders and exposure to Ergonomic risk factors among handicraft workers," *Pakistan Journal of Medical Sciences*, vol. 37, no. 2, p. 5, Jan. 2021.
- [60] C. Davison, T. P. Cotrim, and S. Gonçalves, "Ergonomic assessment of musculoskeletal risk among a sample of Portuguese emergency medical technicians," *Intern. Journal of Industrial Ergo.*, vol. 82, p. 103077, Mar. 2021.
- [61] J. D. Pugh *et al.*, "Changes in exercise and musculoskeletal symptoms of novice nurses: A one-year follow-up study," *Collegian*, vol. 28, no. 2, pp. 206–213, Apr. 2021.
- [62] H. Iridiastadi, T. Vani, and P. A. R. Yamin, "Biomechanical Evaluation of a Patient-Handling Technology Prototype," *International Journal of Technology*, vol. 11, no. 1, p. 180, Jan. 2020.
- [63] G. Kar and A. Hedge, "Effect of workstation configuration on musculoskeletal discomfort, productivity, postural risks, and perceived fatigue in a sit-stand-walk intervention for computer-based work," *Applied Ergonomics*, vol. 90, p. 103211, Jan. 2021.
- [64] V. M. Manghisi, A. E. Uva, M. Fiorentino, M. Gattullo, A. Boccaccio, and A. Evangelista, "Automatic ergonomic postural risk monitoring on the factory shopfloor -The Ergosentinel tool," in *Procedia Manufacturing*, Jan. 2020, vol. 42, pp. 97–103.
- [65] A. C. Bonini-Rocha, R. A. C. de Oliveira, M. Bashash, G. do Couto Machado, and V. R. N. Cruvinel, "Prevalence of musculoskeletal disorders and risk factors in recyclable material waste pickers from the dump of the structural city in Brasília, Brazil," *Waste Management*, vol. 125, pp. 98–102, Apr. 2021.

- [66] L. Widodo, Adianto, Yenita, and C. Ruslie, "Ergonomic analysis by using REBA, WERA and biomechanics method in the production process of women's bags in small industry (SME)," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1007, p. 012088, Dec. 2020.
- [67] K.-H. Choi *et al.*, "Application of AULA Risk Assessment Tool by Comparison with Other Ergonomic Risk Assessment Tools," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 18, p. 6479, Sep. 2020.
- [68] Mulyadi, A. Nurwahidah, and D. Nismar Satria, "Ergonomic risk analysis of lecture chairs at the engineering faculty, Hasanuddin University," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 885, p. 012033, Aug. 2020.
- [69] K. Fahzan bin Salleh, S. Mohd Fadzil, and M. Yusof Md Daud, "Ergonomic Risk Assessment on Welding Practical Work on Learning Process at Malaysia Polytechnic Diploma of Engineering Programme," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 864, p. 012102, Jul. 2020.
- [70] D. Ohlendorf *et al.*, "SOPEZ: study for the optimization of ergonomics in the dental practice - musculoskeletal disorders in dentists and dental assistants: a study protocol," *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 15, no. 1, p. 22, Dec. 2020.

Proceso de optimización de producción a través de la gestión de operaciones: Caso de estudio en una empresa cementera

Lloyd Herbert Morris Molina¹

Juan Luis Arias Vargas²

Olga Jasmin Salazar Herrera³

Homero Murzi⁴

^{1,2} *Universidad Católica de Pereira*

³ *Universidad Libre*

Colombia

⁴ *Virginia Tech University*

Estados Unidos

En este capítulo se presenta el proceso de optimización de la producción a través de técnicas matemáticas para la toma de decisiones en la gestión de operaciones. Para ello, se utiliza modelos de programación lineal, inventario y simulación, dentro de un proceso metodológico iterativo que logra la optimización en la toma de decisiones desde un enfoque interdisciplinario a nivel empresarial y académico. El enfoque epistemológico involucra un método mixto en el que el componente matemático se inserta en un proceso de investigación acción para obtener resultados en ciclos iterativos recursivos, partiendo de decisiones globales hacia decisiones específicas que conducen al mejor escenario en niveles de producción que maximizan la ganancia empresarial. Esta investigación se aplicó en operaciones a la producción de cemento, logrando la optimización de recursos como niveles de inventarios para garantizar la producción, capacidad de manufactura, requerimientos de insumos, entre otros, a través de decisiones interrelacionadas. Finalmente, la principal conclusión es que la innovación para la optimización de los procesos productivos a través de la gestión de operaciones se puede lograr mediante la ejecución de tres etapas: 1) mapeo en investigación acción, 2) identificación de ciclos recursivos, y 3) desarrollo de técnicas matemáticas, en paralelo a los procesos de la discusión recursiva, de la acción investigadora.

¹ Ingeniero Industrial, Magíster en Salud Ocupacional y en Gerencia de Empresas, y Doctor en Ciencias Gerenciales.

Contacto: lloyd.morris@ucp.edu.co

² Ingeniero Industrial, Especialista en Administración de la Informática Educativa y Magíster en Enseñanza de las Matemáticas.

Contacto: juan.arias@ucp.edu.co

³ Ingeniero Industrial, Magíster en Gerencia de Empresas y Doctor en Ciencias Gerenciales.

Contacto: olgaj.salazard@unilibre.edu.co

⁴ B.S. in Industrial Engineering, M.B.A. Focus on Human Resources, M.S. Industrial Engineering y Ph.D. in Engineering Education.

Contacto: hmurzi@vt.edu

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de optimización de la producción a través de la gestión de operaciones, desde una perspectiva histórica, han implicado tácitamente dos mundos que se han desarrollado en paralelo en la vida cotidiana, ciertamente por separado, bajo paradigmas cualitativos y cuantitativos, hacia los bienes y hacia los servicios, pero que hoy, dadas las nuevas necesidades del contexto en las operaciones, hay evidencia clara de complementación, combinación o inclusión de ambos paradigmas con el fin de aumentar la competitividad en la gestión de operaciones.

En [1] se afirma que el propósito central de los estudios de métodos mixtos es obtener sinergia mediante el uso de enfoques cuantitativos y cualitativos, de modo que se pueda lograr la comprensión de fenómenos complejos que ninguno de los enfoques por sí solos podría lograr. En este sentido, [2], al hacer comparaciones de los métodos utilizados en la investigación de gestión de operaciones, los métodos cuantitativos representan el 76%, los cualitativos el 14%, mientras que las investigaciones mixtas alcanzan solo el 10%, más sin embargo, un hecho relevante es que el comportamiento histórico del uso de métodos mixtos en la investigación está creciendo, de modo que en el presente y en el futuro, hay nuevas realidades que exigen mayores niveles de uso de métodos de investigación mixtos.

En esta realidad, [3] indica que se necesita una forma diferente de minimizar el desenfoque de los gestores de operaciones al seguir tratando de cubrir servicios y activos separados y no integrados. La realidad es que los límites entre productos y servicios se están desdibujando dada la diversidad de particularidades que se están produciendo en el contexto mundial ya que los productos actuales se caracterizan por bienes y servicios agrupados.

Por lo tanto, hay varias razones para este movimiento combinado entre bienes y servicios, hacia una propuesta en la que la gestión de operaciones desarrolla enfoques de valor donde puede integrar aspectos cuantitativos y cualitativo, para lograr esta combinación [3], establece una propuesta de valor agrupada en cuatro categorías: capacidad de almacenamiento, intensidad de integración, consumo simultáneo y dificultad para evaluar el rendimiento.

Además, [4] denota que el comienzo de métodos mixtos en la gestión de las operaciones es desde 2004, y reconoce que los criterios para el desarrollo de métodos mixtos son más enriquecedores, más rigurosos y reflexivos, de modo que se sugiere el uso de métodos mixtos para abordar fenómenos complejos en los que se deben dejar de lado los paradigmas tradicionales para dar un salto que permita lograr la investigación de fenómenos multifacéticos de una manera innovadora.

[5] define las operaciones, como la gestión de bienes y servicios que, dadas las nuevas realidades en el contexto de las operaciones, necesita un enfoque integrador entre las funciones de: comercialización, desarrollo de productos/servicios y operaciones. En el sentido de que se requiere un análisis integrador desde la perspectiva de las operaciones en procesos de investigación, el presente estudio presenta una visión global sobre los procesos de optimización de la producción en la gestión de operaciones bajo un enfoque mixto de investigación, el uso de modelado matemático e investigación acción, que dentro del método mixto y de acuerdo con los objetivos de investigación, adopta el enfoque predominante en el que el método cualitativo domina sobre el cuantitativo [2].

En este trabajo se desarrolla la optimización de la producción, desde una perspectiva de sistemas interconectados, considerando como caso de estudio el proceso productivo cementero, que logra la cuantificación de los resultados teniendo en cuenta la combinación del método matemático y el de investigación acción, caracterizando este último como un método que, después de identificar un problema, lo estudia con el fin de encontrar una solución desde la práctica. [6] señala que:

La investigación acción es una opción metodológica de gran riqueza ya que por un lado permite la expansión del conocimiento y por otro da respuestas concretas a los problemas que plantean los participantes de la investigación, que a su vez se convierten en coinvestigadores que participan activamente a lo largo del proceso de investigación y en cada etapa o vínculo en el ciclo que se origina como resultado de las constantes reflexiones que se provocan en ese proceso.

Lo que ha permitido que producto de la reflexión, el diagnóstico y el análisis, el equipo interdisciplinario planteó tres categorías que abordan la necesidad de optimizar la producción del caso estudio cementero, desde: el conocimiento, la aplicabilidad y la utilidad de técnicas de la gestión de operaciones. Posteriormente, se establecen tres ciclos que obedecen a las áreas de mejora en el contexto productivo, a los que se les aplicó iterativamente el método de investigación acción, que se compone de cuatro fases y que se explican de forma específica posteriormente en los apartados metodológicos y de resultados.

Las mejoras en las operaciones son constantes, dados los diversos factores como los niveles de competitividad en el contexto global, la naturaleza cambiante del comercio mundial, el desarrollo de nuevos enfoques de gestión e incluso en situaciones en las que se dispone de los mejores estándares de funcionamiento, lo que se requiere la mejora continua de los mismos, ya que la competencia está mejorando constantemente [5]. En este sentido, una alternativa que los gerentes tienen en las operaciones es la inclusión de modelos o técnicas que simplifiquen la representación de la realidad pero que, al incorporar los aspectos más relevantes de una situación, representen una valiosa oportunidad para tomar mejores decisiones [7].

Por lo tanto, hay una gran diversidad de técnicas que pueden apoyar la toma de decisiones, pero aquellos enfocados en procesos de optimización son de naturaleza matemática que representa el campo de acción del alcance en la ciencia y la gestión de la ingeniería [8]. En este aspecto, según lo declarado por [9] y [10], dentro de los modelos más utilizados para la optimización en la gestión de operaciones son los relacionados con la programación lineal, la simulación, los inventarios y redes; que se han convertido en herramientas importantes en los procesos de toma de decisiones.

El modelado a través de programación lineal se estructura en función de la identificación de las variables del problema, que se pueden denominar variables instrumentales, de la misma manera que se establece la función objetivo. El programa puede ser un programa de maximización o minimización, donde las variables del problema se identifican por X_j con $j = 1; \dots; n$ y b_i para $i = 1; \dots; m$, representa la cantidad disponible de un recurso determinado.

En consonancia con el método anterior, los modelos y técnicas de inventario se utilizan en los procesos de búsqueda de optimización y mayor rentabilidad de una empresa, donde se convierten en el elemento clave de cualquier organización, ya que a través de su gestión eficiente garantiza la operatividad, utilidad y rentabilidad de la empresa [11] y [12], razones por las que es un elemento fundamental para tener en cuenta por los gerentes en la toma de decisiones.

[11] y [13] afirman que los inventarios flexibilizan las operaciones dando oportunidades de holgura entre la oferta y la demanda; además, que los inventarios de productos se convierten en una necesidad absoluta ya que generan oportunidades de desarrollo y expansión en los procesos, impactando en los niveles de rentabilidad de la organización, por lo tanto, los estudios de gestión de inventario representan un factor estratégico de negocio.

Además, la simulación es una herramienta de gran valor que tiene el poder de establecer relaciones entre modelos, ya que esto representa una secuencia de procesos estructurados que se pueden utilizar en la investigación cualitativa y cuantitativa, representando ambas posiciones ya sea por separado o combinadas. Esta realidad se da debido a que la simulación requiere de una comprensión, que necesita una perspectiva cualitativa y de una medición que requiere de una perspectiva cuantitativa [14]. En este sentido, tal y como recomienda [15]:

El diseño, establecimiento y mantenimiento de sistemas administrativos y productivos para un funcionamiento eficiente, los ingenieros y otros profesionales en las organizaciones utilizan herramientas de investigación de operaciones como medio de optimización.

Es así es como este trabajo centra su desarrollo en lograr la optimización de la producción, a través de la aplicación de técnicas de programación lineal, sistemas de inventario y simulación, bajo el foco de la investigación acción, lo que impacta positivamente en la toma de decisiones de los procesos.

Finalmente, en las siguientes secciones se presentará el enfoque metodológico con la aplicación de cada uno de los tres ciclos establecidos, partiendo de una fase inicial de diagnóstico e identificación de necesidades, el diseño de un plan de acción, consistente en cuatro se aplican iterativamente para generar las oportunidades de mejora en un plan de producción integrado, una propuesta para el control integrado de los niveles de inventario y el control integrado de los niveles de producción en paralelo a los procesos de discusión recursiva, de la acción investigadora entre los integrantes del equipo de estudio.

2. MÉTODO

Desde la perspectiva pragmática, para el estudio específico propuesto: Optimización de los procesos de producción en la toma de decisiones en las operaciones, se utilizó el método más adecuado: el método mixto. Esta perspectiva implica vincular datos cualitativos y cuantitativos en el mismo estudio [16], donde la cuestión metodológica fundamental se centró en cómo los gerentes de operaciones pueden hacer uso de las técnicas de investigación de operaciones para optimizar los procesos de toma de decisiones. A este respecto [17], indica que se debe definir y explorar el enfoque orientado a la acción con la lógica de aplicar la investigación acción, de modo que logre describir y comprender los problemas en la del ámbito operativo, vinculando la investigación acción con la gestión de operaciones.

En este sentido, se lleva a cabo una integración de métodos, a través de la estrategia de combinación, en donde el resultado obtenido en el método cuantitativo se utiliza para avanzar en los resultados del método cualitativo [18]. Este proceso permite aumentar la calidad de los resultados hacia el método receptor, que en el caso del estudio fue la investigación acción.

En la Figura 1, como lo expresa [18], de las tres alternativas en métodos mixtos se utiliza la segunda referida a la combinación del método cuantitativo hacia su inserción en el método cualitativo, por lo tanto, los resultados del método cuantitativo se incorporan en algunas fases del método cualitativo. Otra característica importante de esta es la naturaleza recursiva de este tipo de investigación, como lo indica [19], es que la acción del investigador está en el campo de los ciclos de acción, constituyendo una espiral que se detalla en la siguiente sesión.

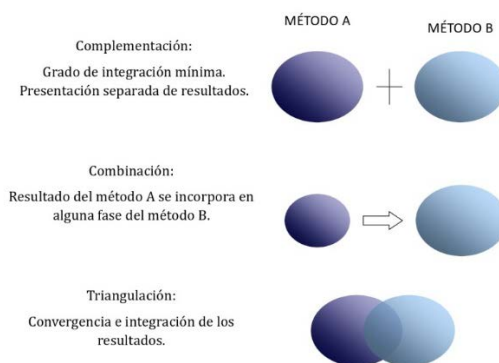


Figura 1. Estrategias de Integración

2.1 Mapa del proceso de investigación acción para métodos de investigación

Teniendo en cuenta las directrices básicas sugeridas por [16] y [19]: observar, pensar, actuar y reflexionar, el proceso de investigación acción para los métodos de investigación en el presente estudio, se describen mediante el siguiente plan de acción que consta de cuatro fases (Figura 2). Para el momento de inicio de estas fases hay una fase 0 de inicio, que se genera una sola vez, mientras que las cuatro fases restantes son iterativas que se producen en ciclos que se deben definir de acuerdo a las áreas de mejora en la acción de las técnicas de gestión.

2.1.1 Fase 0: Fase inicial

[6] y [16] indican que todo inicio de la investigación acción necesita de requisitos de iniciación contemplados en la fase inicial (Fase 0). Esta fase, requiere de la constitución del grupo interdisciplinario de estudio o

equipo intencional de estudio, que para la presente investigación quedó compuesto por: un gerente de operaciones, un profesor de investigación de operaciones, un profesor de gestión de operaciones e investigadores. La identificación de necesidades, problemas o centros de interés dio lugar a la reflexión sobre las acciones de las técnicas de gestión en los procesos de fabricación en las categorías de: conocimiento, aplicabilidad y utilidad.

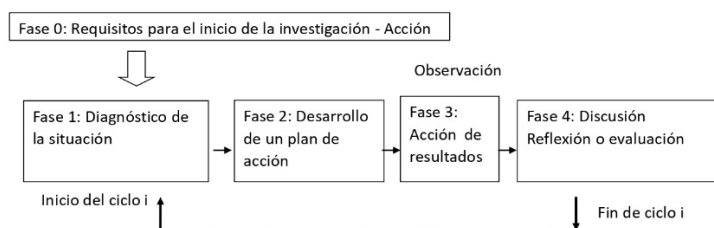


Figura 2. Mapa del proceso de investigación acción

Con respecto a los conocimientos, se identificaron los siguientes temas: información, capacitación y formación; en términos de aplicabilidad: elementos prácticos, teóricos y básicos para su desarrollo; y en términos de utilidad, se identificaron problemas en: toma de decisiones, optimización, control y procesos.

2.1.2 Fases posteriores: Ciclos en las áreas de mejora en la acción de las técnicas de gestión

[10] y [20] mencionan la utilidad del enfoque recursivo, a través del cual se obtiene la solución óptima descomponiéndose el problema a través de etapas, donde cada una de ellas comprende un subproblema, teniendo como ventaja la implicación del problema macro en subproblemas que más tarde, a través de relaciones recursivas, la solución de optimización se obtiene en cada etapa hacia la solución integral del sistema analizado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Basándose en los problemas de fabricación de las plantas cementeras susceptibles a la acción de las técnicas de gestión, el equipo de estudio estableció tres áreas de mejora, a través de la identificación de tres técnicas de gestión que contribuyen a la solución desde una perspectiva recursiva. Estas áreas - técnicas de acción, representan los ciclos de investigación acción, donde los resultados de cada ciclo están relacionados con los siguientes, bajo el principio de recursividad en la fase de reflexión de cada uno de ellos en sí. La Tabla 1 muestra los ciclos que se requerían.

Tabla 1. Ciclos de las áreas de mejora en la acción de las técnicas de gestión

	Oportunidad de mejora	¿Puede ayudar la investigación a través de técnicas de gestión?
Ciclo 1	Falta de plan de producción integrado	Sí. Técnica propuesta Programación Lineal.
Ciclo 2	Control integrado de los niveles de inventario.	Sí. Modelo de inventario en el proceso de producción.
Ciclo 3	Control integrado de los niveles de producción.	Sí. Simulación en el sistema de producción.

Cada uno de estos ciclos se estructuran mediante las cuatro fases visualizadas en la figura 2, que se expondrán en el desarrollo de cada ciclo, dividiendo el problema en tres ciclos interrelacionados, la solución de optimización para el plan de producción integrado (ciclo 1), es la entrada necesaria para el control de los niveles de inventario (ciclo 2), que finalmente a través de la interacción de estos dos ciclos previos proporcionan la información necesaria para para el control de los niveles de producción (ciclo 3) y los que en el punto de conexión (Fase 4), se tiene un cierre valorativo del proceso ejecutado por el grupo interdisciplinario de estudio.

3.1 Plan de producción integrado (Ciclo 1)

[21] y [22] sugieren modelos de optimización para la consecución de objetivos empresariales, especialmente la optimización lineal, expuesta como uno de los que puede describir el comportamiento de una organización, lo que le permite cumplir mejor sus objetivos.

3.1.1 Fase 1: Diagnóstico de la situación para el desarrollo de la programación lineal PL

Como resultado del diagnóstico bajo un enfoque interdisciplinario en el ciclo 1 (un gerente de operaciones, un profesor de investigación de operaciones, uno de gestión de operaciones e investigadores), se obtiene:

- Falta un plan de producción de mezclas.
- Falta de productos en el embolsado.
- Falta de productos en la molienda de cemento.
- Falta de relación de productos de cocina.
- Falta de relación de los productos en el consumo de carbón.
- Mezcla de productos bajo demanda.
- Hay información sobre las capacidades de producción, las relaciones entre los productos, las capacidades de almacenamiento, entre otros.
- Hay cambios en los escenarios de demanda.

3.1.2 Fase 2: Desarrollo del plan de acción (Formulación del modelo)

El plan de acción propuesto por el equipo interdisciplinario contiene:

- Incorporación de la mezcla de productos.
- Incorporación de la relación con el producto.
- Incorporación de relación de productos en embalaje.
- Incorporación de una lista de productos en la molienda de cemento.
- Incorporación de la lista en fase de horneado.
- Incorporación de una lista de productos en el consumo de carbón.
- Incorporación de la mezcla de productos bajo demanda.

3.1.3 Fase 3: Resultados

Acción. Formulación del modelo e Implementación del plan. Los componentes que forman parte de este proceso son: las variables de decisión, la función objetivo y las limitaciones o restricciones. Las variables de decisión definidas son las toneladas de producción de cada tipo de cemento Portland II que se fabricarán diariamente a partir del cemento Portland II (Cp1), cemento Portland II con 3% de piedra caliza (Cp2) y cemento Portland II con 5% de piedra caliza (Cp3).

En cuanto al segundo componente, la función objetivo seleccionada corresponde a la maximización del beneficio, que equivale a la suma de las contribuciones individuales de cada producto al beneficio total del negocio. En la tabla 2, se pueden distinguir tres productos de cemento dentro de los tipos de cemento Portland II, y donde se desarrolla la fórmula para maximizar la ganancia total durante un período de producción diario (USD \$/Día).

El tercer y último componente se divide en dos grupos de restricciones: la capacidad de producción instalada y la demanda de productos. Para el primer grupo hay un total de cinco restricciones, mientras que para el segundo grupo hay un total de tres restricciones.

Tan pronto como se analizó la capacidad en cada una de las etapas básicas de producción: molienda de crudo (crudo), cocción (hornos) junto con molienda de carbón (carbón), molienda de Clinker (cemento) y embolsado, se logra establecer la relación de la siguiente forma: en la molienda de crudo no debe exceder la capacidad instalada de 1560 Ton/día de mezcla cruda, en términos de la capacidad en horno es de 550 tonelada/día de Clinker, la capacidad en molienda de carbón es de 127,2 tonelada/día de carbón molido requerido en hornos, la capacidad en la molienda de Clinker (cemento) es de 840 tonelada/día y la capacidad de la etapa final para el embolsado de cemento es de 2346 ton/día de cemento.

En cuanto al análisis de mercado, se realizó un estudio utilizando técnicas de previsión para establecer las cantidades mínimas requeridas en el mercado para cada tipo de producto ofrecido por la empresa. Para

cemento Portland II sin aditivos, se establece una cuota mínima requerida en el mercado de 360 ton/día de cemento, para cemento Portland II con 3% de piedra caliza hay un valor mínimo requerido de 144 toneladas/día y para cemento Portland II con 5% de piedra caliza tiene un requisito mínimo de 216 toneladas/día de cemento.

De esta forma, el modelo de optimización lineal se estructura con la intención de obtener el mayor nivel de producción de los tres cementos Portland II con el fin de maximizar el beneficio de la empresa, pero sujeto a las capacidades de producción en mezcla cruda (crudo), hornos rotativos (cocción), molinos de carbón, cementera y en máquinas para productos de embolsado.

La Tabla 2 muestra el resultado de la formulación del modelo bajo la técnica de programación lineal, teniendo en cuenta la maximización de la ganancia diaria de la colocación de la mezcla de cemento Portland II gris en el mercado.

Tabla 2. Formulación del modelo PL

Mezcla de productos			
Cemento Portland II sin aditivos (Cp1)			Tonelada/día Cp1
Cemento Portland II con 3% de piedra caliza (Cp2)			Tonelada/día Cp2
Cemento Portland II con 5% de piedra caliza (Cp3)			Tonelada/día Cp3
MODELO PL:			
Ganancia máxima		$130 \cdot Cp1 + 125 \cdot Cp2 + 120 \cdot Cp3$	U\$ / día
Suyos	1 embolsado	$Cp1 + Cp2 + Cp3$	2346 Cemento de tonelada/día
	2 Cemento	$Cp1 + Cp2 + Cp3$	840 Cemento de tonelada/día
	3 Hornos	$0.91 \cdot Cp1 + 0.952 \cdot Cp2 + Cp3$	550 Ton/día Clinker
	4 Mezcla cruda	$1.436 \cdot Cp1 + 1.505 \cdot Cp2 + 1.58 \cdot Cp3$	1560 Tonelada/día crudo
	5 Carbón	$0.218 \cdot Cp1 + 0.229 \cdot Cp2 + 0.24 \cdot Cp3$	127.2 Tonelada/día carbón
	6 Cp1		360 Cemento de la tonelada/día
	7 Cp2		144 Cemento de la tonelada/día
	8 Cp3		216 Cemento de la tonelada/día
Cp1, Cp2, Cp3 no negativos			

La formulación se desarrolló en sesiones del grupo de estudio, en las que se llegó a un consenso para la recopilación de información basada en las estimaciones reales de ingresos y gastos, las capacidades de producción y el entorno de demanda estimado. La solución de la formulación del modelo por Win QSB, en su módulo de programación lineal, se muestra en la Figura 3.

Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1 X1	360.0000	130.0000	46,800.0000	0	basic	109.0000	M
2 X2	144.0000	125.0000	18,000.0000	0	basic	114.5000	M
3 X3	65.6000	120.0000	7,872.0000	0	basic	0	131.0044
Objective	Function	(Max.) =	72,672.0000				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1 C1	569.6000	<=	2,346.0000	1,776.4000	0	569.6000	M
2 C2	569.6000	<=	840.0000	270.4000	0	569.6000	M
3 C3	530.2880	<=	550.0000	19.7120	0	530.2880	M
4 C4	837.3280	<=	1,560.0000	722.6720	0	837.3280	M
5 C5	127.2000	<=	127.2000	0	500.0000	111.4560	131.9309
6 C6	360.0000	<=	360.0000	0	21.0000	194.4220	432.2202
7 C7	144.0000	<=	144.0000	0	10.5000	0	212.7511
8 C8	65.6000	<=	216.0000	150.4000	0	65.6000	M

Figura 3. Solución de modelo PL (por software QSB)

Para la fase de implementación los principales aportes para el análisis de la solución y aplicación del modelo son: Producir a un nivel de 360 toneladas/día de Cp1, 144 toneladas/día de Cp2 y 65,6 toneladas/día de Cp3, para maximizar el beneficio de la empresa en 72.672 dólares diarios. El cuello de botella (que limita el nivel de producción de la planta) es la molienda del carbón (holgura nula), pero que a través del precio dual se identifica una alternativa para aumentar su capacidad, en la que, si se realizan inversiones, se estima un beneficio de USD\$ 500 por cada tonelada de carbón adicional que se incluya al sistema hasta un máximo aproximado de 5 ton/día adicionales. Otras alternativas interesantes, se evidencian en el análisis de la

demanda de los productos Cp1 y Cp2 que alcanzaron su punto máximo en la solución inicial, que con estrategias de marketing pueden cubrir márgenes de hasta 72 ton día-Cp1 y 68 ton-día de Cp2 para obtener según los precios duales beneficios de USD\$21 y USD\$10,5 por toneladas diarias, respectivamente. Finalmente, otro elemento rescatable, es que para mantener la solución óptima inicial, la combinación de producción propuesta (cantidades a producir) no está influenciada por un aumento en las ganancias unitarias de los productos Cp1 y Cp2, pero si con un tope máximo en la ganancia Cp3 que es de USD\$ 131 (límite superior), es decir lo máximo en aumento en ganancia unitaria para Cp3 es de USD\$ 11.

3.1.4 Fase 4: Discusión recursiva

Para esta fase, se utiliza la guía de ocho temas para la reflexión individual. Dentro de este proceso, cada participante desarrolló un nivel más alto en: información, formación y aprendizaje de técnicas de gestión, aplicabilidad teórica y práctica, y disposición utilizadas para la toma de decisiones, optimización y control de técnicas de gestión en procesos de fabricación

La evaluación individual del nivel de conocimiento, aplicabilidad y utilidad alcanzado en las técnicas de gestión en acción, bajo una escala similar con un mínimo de uno (1) y un máximo de (5), generó un consenso medio de 3,66 sobre 5 puntos (Tabla 3). Las valoraciones están codificadas con VMO: Valoración del gerente de operaciones, VTOR: Valoración del profesor en investigación de operaciones, VTMO: Valoración del profesor en gestión de operaciones, VR: Valoración de los investigadores.

Tabla 3. Reflexión sobre las acciones del ciclo 1

Temas		del	VTOR	VTOM	Vie
Conocimiento	Información, Formación y Aprendizaje	2	3	4	4
	Alcance práctico	3	3	4	4
Aplicabilidad	Alcance teórico	3	4	4	4
	Artículos básicos	4	3	4	4
Utilidad	Toma de decisiones	3	4	5	4
	Optimización de procesos	3	4	4	4
	Control de procesos	3	3	4	4
	Procesos	3	4	4	4
				Promedio	3.66

Además, se hace una reflexión sobre la información en acción entre los modelos para su conectividad y el efecto de recursividad: La creación del modelo PL para el plan de formación integrado, dando como resultado el nivel de producción óptimo, lo que permite establecer cantidades en referencia a los niveles de inventario. Por esta razón, la técnica hacia el siguiente ciclo está relacionada con modelos de inventario para el control integral de los niveles de inventario.

3.2 Control integral de los niveles de inventario (Ciclo 2)

La información del ciclo 1 es de vital importancia para el desarrollo del ciclo 2 en el que se utilizan modelos de inventario para optimizar las decisiones de proceso en este campo.

3.2.1 Fase 1: Diagnóstico de la situación para el desarrollo del Modelo de Inventario en el proceso de producción

Como resultado del diagnóstico bajo un enfoque interdisciplinario en el ciclo 2 (un gerente de operaciones, un profesor de investigación de operaciones, uno de gestión de operaciones e investigadores), se obtiene:

- No hay registro de costos de gestión o mantenimiento o costos que faltan.
- Hay información sobre las capacidades de almacenamiento.
- Hay información de consumo en cada una de las áreas de producción.
- No hay registros sobre los tiempos de espera.
- Parte de los resultados del ciclo anterior.

3.2.2 Fase 2: Desarrollo del plan de acción (Formulación del modelo)

El plan de acción propuesto por el equipo interdisciplinario contiene:

- Establecer niveles de inventario basados en el estudio PL.
- Establezca los momentos de orden.
- Analizar materias primas: piedra caliza, arcilla de hierro (Fe), Aluminio (Al) y Sílice (Si). Además, crudo (pasta) en balsa.
- Analizar la combustión, el carbón como diésel.
- Analizar materias primas en molienda de cemento: clinker y yeso.
- Analizar embolsado: cemento a la venta incorporando la mezcla de productos PL.

3.2.3 Fase 3: Resultados

Principales aportes del análisis de la solución del modelo: producir un nivel de 360 toneladas/día de Cp1, 144 toneladas/día de Cp2 y 65,6 toneladas/día de Cp3, de forma que se activen los procesos de adquisición o producción para mantener los niveles de inventario de acuerdo con los días previstos con los niveles de seguridad.

Acción: Implemente el plan. Esta fase se abordó en dos momentos, el momento de niveles de inventario para la etapa de cocción – hornos y el momento de niveles de inventario para la etapa de venta:

Momento 1 - Inventario para Hornos: tomando como referencia la zona de cocción con un nivel de producción ajustado a la optimización de 530 toneladas de clinker por día (resultado del ciclo anterior, Figura 3), se desarrollan cálculos con análisis de modelos de inventarios según tipo de materia prima o de subproductos, obteniéndose según las toneladas reales de consumo y los niveles de seguridad en inventario (d: días), los estatus de toneladas mínimas en inventario y las alertas o no para los momentos de reposición del inventario que se muestra en la Figura 4.

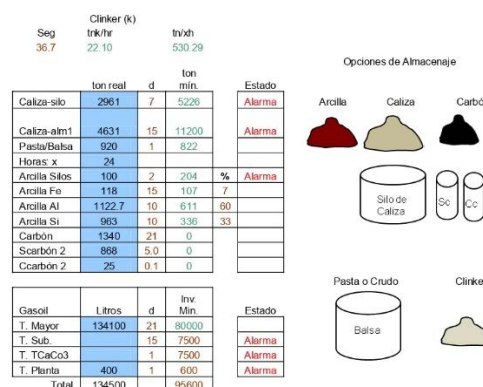


Figura 4. Solución del modelo de inventario (Momento 1: Cocción)

El segundo momento, tomando como referencia la demanda total 569.6 ton/día de la mezcla de productos optimizados de acuerdo con el modelo PL, se detalla en la Figura 5, los estatus de toneladas mínimas en inventario y las alertas o no para los momentos de reposición del inventario a partir de las toneladas reales producción para la venta y los niveles de seguridad en inventario (d: días).

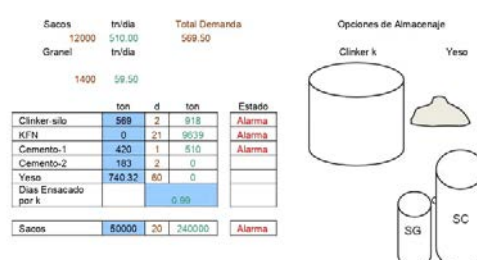


Figura 5. Solución del modelo de inventario (Momento 2: Venta - Ensayado)

3.2.4 Fase 4: Discusión recursiva

Reflexión sobre las acciones de las técnicas de gestión. Dentro de este proceso, cada participante obtuvo un nivel más alto en: información, formación y aprendizaje de técnicas de gestión, aplicabilidad teórica, aplicabilidad práctica, disposición, utilidad para la toma de decisiones, optimización y control de técnicas de gestión en procesos de fabricación. La evaluación individual sobre el nivel de conocimiento, aplicabilidad y utilidad alcanzados en las técnicas de gestión en acción, bajo una escala similar, se muestra en la Tabla 4, con un promedio para el ciclo 2 de 3,97 puntos. Al conectar los cálculos del ciclo 1 con el ciclo 2 desde el punto de vista recursivo, se indican los promedios individuales con un promedio recursivo en el ciclo 2 de 3.80 (Tabla 5).

Tabla 4. Reflexión sobre las acciones del Ciclo 2

	Temas	del	VTOR	VTOM	Vie
Conocimiento	Información, Formación y Aprendizaje.	3	4	4	4
	Alcance práctico.	3	4	4	5
Aplicabilidad	Alcance teórico.	4	4	4	4
	Artículos básicos.	3	4	4	5
Utilidad	Toma de decisiones.	4	4	5	5
	Optimización de procesos.	4	3	4	4
	Control de procesos.	4	4	4	4
	Procesos.	3	4	4	4
Promedio					3.97

Tabla 5. Reflexión sobre las acciones recursivas en el ciclo 2

	Temas	del	VTOR	VTOM	Vie
Conocimiento	Información, Formación y Aprendizaje.	2.5	3.5	4	4
	Alcance práctico.	3	3.5	4	4.5
Aplicabilidad	Alcance teórico.	3.5	4	4	4
	Artículos básicos.	3.5	3.5	4	4.5
Utilidad	Toma de decisiones.	3.5	4	5	4.5
	Optimización de procesos.	3.5	3.5	4	4
	Control de procesos.	3.5	3.5	4	4
	Procesos.	3	4	4	4
Promedio					3.8

Por lo tanto, del ciclo 1 al ciclo 2 hay una mejora recursiva en los niveles de conocimiento, utilidad y aplicabilidad de las técnicas en el equipo de estudio. Además, se hace una reflexión sobre la información en acción entre modelos para su conectividad en los ciclos 1 y 2: la ejecución del modelo PL para el plan de formación integrado establece el nivel de producción flexible, estos niveles de producción permitidos para establecer los niveles de seguridad en el inventario, lo que facilita entre otros aspectos, la programación en la producción y en los procedimientos de adquisición de materia prima.

3.3 Control integral de los niveles de producción, complementado a través de la simulación (Ciclo 3)

El ciclo 3 representa el cierre de los subsistemas creados, por lo que este ciclo incorpora datos e información de ciclos anteriores tales como: niveles óptimos de producción de cada producto; incidencia de los niveles de producción en áreas de fabricación como molienda, cocción y embolsado; niveles de inventario necesarios para apoyar la optimización del sistema y las existencias de seguridad para garantizar la continuidad en el funcionamiento de los procesos de producción.

3.3.1 Fase 1: Diagnóstico de la situación para el desarrollo del Modelo de Simulación en el proceso de producción

Como resultado del diagnóstico bajo un enfoque interdisciplinario en el ciclo 3 (un gerente de operaciones, un profesor de investigación de operaciones, un profesor de operaciones e investigadores), se obtiene:

- No hay registros adaptados a la propuesta de implementación del plan de producción integrado.

- No hay evidencia de estudios sobre el comportamiento estadístico de las variables de producción.
- Hay información de consumo en cada una de las áreas de producción.
- Las propuestas para la optimización del plan de producción integral son de su propiedad.
- Ser parte de los resultados de los ciclos anteriores.

3.3.2 Fase 2: Desarrollo del plan de acción (Formulación del modelo).

El plan de acción propuesto por el equipo interdisciplinario contiene:

- Funcionamiento en hornos las 24 horas del día (Requisito de afectación del sistema y minimización de los costos de funcionamiento).
- Funcionamiento en la molienda de crudo de acuerdo con la fluctuación en los niveles de inventario y la interrelación del sistema de producción. (Ahorro de energía)
- Funcionamiento en molienda de cemento de acuerdo con la fluctuación en los niveles de inventario y la interrelación del sistema de producción. (Ahorro de energía)
- Operación de embolsado de acuerdo con la fluctuación en los niveles de demanda. (Ahorro de energía)
- Establecer niveles de inventario basados en el estudio de inventario.
- Establecer niveles de capacidad, demanda y producción según el modelo de programación lineal.

3.3.3 Fase 3: Resultados

Acción: Implemente el plan. La implementación del plan también tiene un carácter recursivo de tres momentos, donde el momento III está conectado con el momento II y el momento I. El momento I, representa el comienzo del proceso en la planta de cemento donde se lleva a cabo la molienda para producir la pasta (crudo), mostrado en la Figura 6. Aquí tiene la sincronización del modelo con materias primas como piedra caliza y arcilla, así como con las capacidades del equipo de producción.

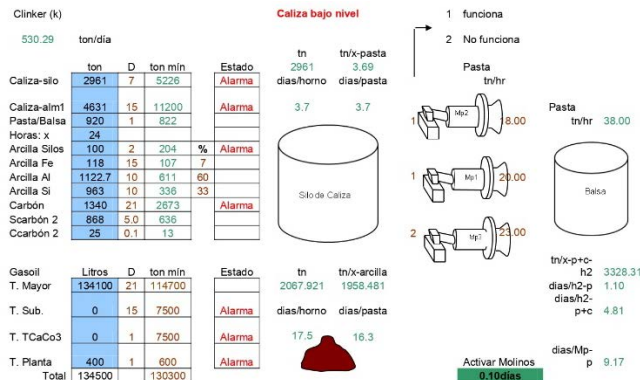


Figura 6. Solución del modelo de Simulación (Momento 1: Pasta - Crudo)

El momento II, este se puede visualizar en la Figura 7, en donde se genera un proceso de simulación para los niveles de cocción para producir clinker y eso vincula la secuencia de producción con la molienda de cemento. Además, establece las directrices en tiempo real para la activación o no de las áreas de molienda y molienda de carbón de pasta o crudo.

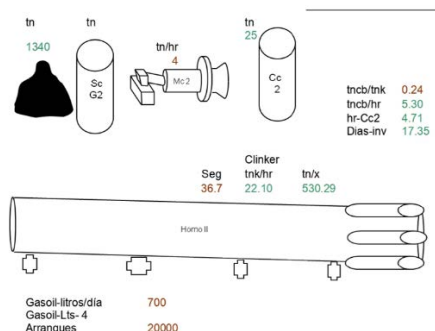


Figura 7. Solución del modelo de Simulación (Momento 2: Cocción)

El momento III, este se puede visualizar en la Figura 8, en donde se genera un proceso de simulación que comienza con el establecimiento de las necesidades de demanda cuantificadas en 560 toneladas, unas 13400 bolsas de cemento de la mezcla de productos producidos. A partir de ahí, obtiene la planificación y el escenario para la ejecución y control de la producción desde el área de embolsado hasta el área de molienda de cemento, que finalmente cubre las ventas ajustadas a los requerimientos de los clientes de 569.6 toneladas por día en los tres tipos de cementos ofertados por la empresa: Portland II sin aditivos, con una cuota de 360 ton/día de cemento, para cemento Portland II con 3% de piedra caliza hay un valor mínimo requerido de 144 tonelada/día y para cemento Portland II con 5% de piedra caliza tiene un requisito mínimo de 65.6 tonelada/día de cemento.

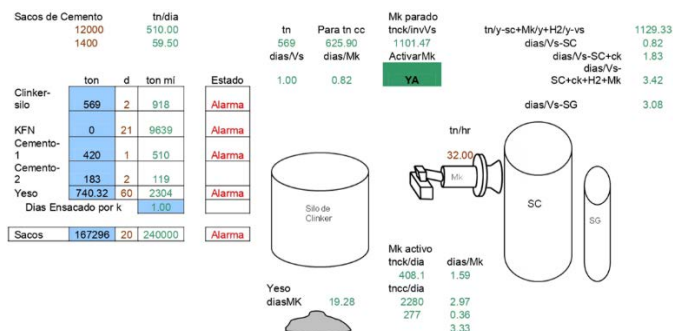


Figura 8. Solución del modelo de Simulación (Momento 3: Cocción)

3.3.4 Fase 4: Discusión recursiva

Reflexión sobre las acciones de las técnicas de gestión. Los momentos I, II y III están interconectados al proceso de simulación. Cada uno de los participantes obtiene un nivel más alto en: información, formación y aprendizaje de técnicas de gestión, aplicabilidad teórica, aplicabilidad práctica, disposición, utilidad para la toma de decisiones, optimización y control de técnicas de gestión en los procesos de fabricación, según los resultados de la Tabla 6, donde las valoraciones se codifican con VGO: Valoración del gestor de operaciones, VDIO: Valoración del profesor en investigación de operaciones, VDAO: Valoración del profesor en gestión de operaciones, VINV: Valoración de los investigadores.

Tabla 6. Reflexión sobre las acciones del Ciclo 3

	Temas	del	VTOR	VTOM	Vie
Conocimiento	Información, Formación y Aprendizaje	4	4	5	4
	Alcance práctico	4	4	4	5
Aplicabilidad	Alcance teórico.	4	4	4	5
	Artículos básicos	5	4	4	5
Utilidad	Toma de decisiones	4	5	5	5
	Optimización de procesos	4	4	4	4
	Control de procesos	4	5	4	5
	Procesos	4	4	5	4
Promedio					4.34

Esta realidad coincide con la reflexión sobre la información en acción entre modelos para su conectividad en los ciclos 1, 2 y 3: la ejecución del modelo PL para el plan de formación integrado establece el nivel de producción flexible, estos niveles de producción permitieron establecer los niveles de seguridad en el inventario, las acciones lograron la estructura de información necesaria para el modelo de simulación del proceso productivo. La evaluación individual del nivel de conocimiento, aplicabilidad y utilidad alcanzado en las técnicas de gestión en acción, bajo una escala similar, tiene una media para el ciclo 3 de 4,34 puntos. Al conectar los cálculos del ciclo 1 (3,66 puntos) con el ciclo 2 (3,97 puntos) y a su vez con el ciclo 3 (4,34 puntos) se observa una mejora progresiva.

Desde el punto de vista recursivo tiene los promedios individuales de la Tabla 7 con un promedio recursivo en el ciclo 3 de 4,03 puntos. Por lo tanto, a partir del ciclo 1 (3,66 puntos), pasando por el ciclo 2 (3,8 puntos en cálculo recursivo) y alcanzando el ciclo 3 (4,03 puntos en el cálculo recursivo), hay una mejora recursiva en los niveles de conocimiento, utilidad y aplicabilidad de las técnicas en el equipo de estudio.

Tabla 7. Reflexión sobre las acciones recursivas en el ciclo 3

	Temas	del	VTOR	VTOM	Vie
Conocimiento	Información, Formación y Aprendizaje	3.7	4	4.7	4
	Alcance práctico	3.3	3.7	4	4.7
Aplicabilidad	Alcance teórico.	3.7	4	4	4.3
	Artículos básicos	4	3.7	4	4.7
	Toma de decisiones	3.7	4.3	5	4.7
Utilidad	Optimización de procesos	3.7	3.7	4	4
	Control de procesos	3.7	4	4	4.3
	Procesos	3.3	4	4.3	4
	Promedio				4.03

4. CONCLUSIONES

La optimización de los procesos de producción a través de la gestión de operaciones se puede lograr mediante la ejecución de tres etapas: i) Obtener el mapa de procesos en la investigación acción para defender el método mixto de investigación ii) Identificación de ciclos recursivos en las áreas de mejora de procesos, mediante el uso de técnicas interrelacionadas en la gestión de operaciones iii) Desarrollo de técnicas en paralelo a procesos de discusión recursivos, en investigación acción.

La metodología mixta permite abordar problemas complejos combinando las ventajas del enfoque cualitativo y las ventajas del método cuantitativo. En este estudio, la optimización de la producción la realizó un equipo interdisciplinario que, según el enfoque cualitativo en los procesos de comprensión y reflexión, cuantificó las acciones hacia el proceso productivo utilizando modelos matemáticos.

Esta investigación bajo la creación de ciclos recursivos permitió la optimización de la producción a partir de soluciones globales en las que los niveles de fabricación y rentabilidad de la empresa están optimizados en situaciones específicas mediante escenarios óptimos y factibles, para el funcionamiento de procesos a niveles seguros de inventario que garantizan la producción, la capacidad de fabricación, los requisitos de insumos, entre otros.

Este capítulo representa una contribución para futuras revisiones bibliográficas tanto en el aspecto metodológico como en el aspecto práctico en el campo de la gestión de operaciones, dado que las fases metodológicas se desarrollaron en paralelo con las fases de aplicación hacia un caso de producción.

REFERENCIAS

- [1] J. F. Molina-Azorin, "Mixed methods research: An opportunity to improve our studies and our research skills," *European Journal of Management and Business Economics*, vol. 25, no. 2, May 2016.
- [2] R. B. Johnson and A. J. Onwuegbuzie, "Mixed Methods Research: A Research Paradigm Whose Time Has Come," *Educational Researcher*, vol. 33, no. 7, Oct. 2004.
- [3] H. Luiz Corrêa, L. M. Ellram, A. José Scavarda, and M. C. Cooper, "An operations management view of the services and goods offering mix," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 27, no. 5, May 2007.
- [4] R. Cameron, S. Sankaran, and J. Scales, "Mixed Methods Use in Project Management Research," *Project Management Journal*, vol. 46, no. 2, Apr. 2015.
- [5] N. Slack, A. Brandon-Jones, and R. Johnston, *Operations Management*, Seventh Edition. UK: Pearson, 2013.
- [6] E.C. Ana Mercedes and P.M. María Lourdes, "La Investigación Acción. Una herramienta metodológica heurística para la comprensión y transformación de realidades y prácticas socioeducativas," 2008. Recuperado: <https://pdfs.semanticscholar.org/4d6d/c0db90c8d6b1b2540e294ee3955d7442fe35.pdf>, 2008
- [7] W. Stevenson, *Operation Management*, Twelfth Edition. New York: McGraw Hill, 2015.
- [8] D. Reid and N. Sanders, *Operations Management*, 4th Edition. Inc. ited States of America: John Wiley & Sons, 2011.
- [9] J. Stacho, *Introduction to Operation Research*. New York: Columbo University, 2014.
- [10] F. Hillier and G. Lieberman, *Introduction to Operation Research*, 7 th edition. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [11] P. Bilinski, B. Grossl, C. Nogueira, and L. Barbosa, "Aplicação da pesquisa operacional na otimização da lucratividade de uma empresa do segmento de marcenaria," 2016. 2021. Recuperado: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_232_356_29120.pdf
- [12] Y. Durán, "Administración del inventario: elemento clave para la optimización de las utilidades en las empresas," *Visión Gerencial*, vol. 11, no. 1, pp. 55-78, 2012.

- [13] G. B. Irma Yolanda and C. M. Magda, "La gestión de inventario como factor estratégico en la Administración de Empresas," *Revista Científica Electrónica de Ciencias Gerenciales*, vol. 13, no. 37, pp. 109–129, 2017.
- [14] T. Eldabi, Z. Irani, J.R. Paul, and P. E.D. Love, "Quantitative and qualitative decision-making methods in simulation modelling," *Management Decision*, vol. 40, no. 1, Feb. 2002.
- [15] B.C. Yeicy, "Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta," *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 2, no. 7, pp. 85–104, 2011.
- [16] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw-Hill, 2014.
- [17] C. Paul and C. David, "Action research for operations management," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 22, no. 2, Feb. 2002.
- [18] M. Sandín, *Investigación cualitativa en educación: fundamentos y tradiciones*. Madrid: McGraw-Hill, 2017.
- [19] K. Herr and G.L. Anderson, *The Action Research Dissertation: A Guide for Students and Faculty*, Second edition. New York: SAGE Publications, 2014.
- [20] H. Taha, *Operation Research*, 8th Edition. London: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [21] G. Eppen, F. Gould, C. Schmidt, J. Moore, and L. Weatherford, *Investigación de Opresiones en la Ciencia Administrativa*, 5ta edición. México: Prentice Hall, 2000.
- [22] W. Wiston, *Operation Research*. Canada: Thomson Books/Cole, 2004.

Análisis a la intención de compra y de consumo de medicamentos genéricos de los habitantes de una ciudad colombiana

Paola Velásquez León¹
Javier Hernández Cáceres²
Juan C. García-Ojeda³
^{1,2} *Universidad Santo Tomás*
³ *Universidad de Cartagena*
Colombia

En este trabajo se presenta un análisis a la intención de compra de los usuarios consumidores de medicamentos genéricos de los estratos 3 y 4 de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Para ello se elaboró un repositorio con los datos de los usuarios utilizando la metodología de Data Warehouse. Luego se caracterizaron por medio de las variables más representativas empleando técnicas de clasificación y, finalmente, se elaboró un diagnóstico de riesgos percibidos en los usuarios. Se evidenció una aceptación de medicamentos genéricos por parte de los usuarios debido a un precio de venta más asequible.

¹ Contacto: paola.velasquez@ustabuca.edu.co

² Contacto: Javeier.hernandez@ustabuca.edu.co

³ Contacto: jcgarciao@unicartagena.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo da a conocer la intención de compra de los usuarios consumidores de medicamentos genéricos de los estratos 3 y 4 de la ciudad de Bucaramanga. De igual forma se describen los principales riesgos percibidos en el consumo de medicamentos genéricos, debido al sesgo que se tiene sobre este tipo de producto debido a la idea preconcebida que son de baja calidad por a su bajo precio. Inicialmente se describen aspectos históricos, legales y metodológicos que son de importancia dentro del desarrollo de este trabajo; resaltando estudios preliminares sobre la intención de compra de usuarios consumidores de medicamentos genéricos, conceptualización de las normas vigentes, entre otros[1, 2]. Posteriormente se reduce el campo de acción del proyecto para brindar conocimiento sobre el consumo de los medicamentos genéricos en un segmento de la población de Bucaramanga el cual es el nicho de investigación. Allí se desarrolla y se evalúa cada una de las metodologías de trabajo implementadas.

El objeto de análisis se encuentra relacionado con la ingeniería industrial en el área del marketing que abarca temas de recordación o valor de la marca y fidelización. La importancia de estos temas en el campo de los fármacos genéricos se ha visto afectado ya los usuarios tradicionalmente tenían la percepción de bajo costo-baja calidad, tal que la demanda se ha visto influenciada; así como las dudas de los usuarios sobre sobre la eficacia, seguridad y calidad de los fármacos genéricos.

2. MARCO CONCEPTUAL

¿Es posible identificar la intención de compra de medicamentos genéricos en la ciudad de Bucaramanga? Para resolver la interrogante anterior se definió una estrategia de ingeniería cuyo objetivo principal era analizar los hábitos y valores de los consumidores de medicamentos genéricos en la ciudad de Bucaramanga por medio de una metodología basada en minería de datos.

Para lograr dicho objetivo se procedió a definir las siguientes actividades: 1) elaborar un repositorio o almacenaje de datos de los usuarios consumidores de medicamentos genéricos utilizando la metodología de Data Warehouse para la aplicación de técnicas de minería de datos; 2) caracterizar los usuarios consumidores de medicamentos genéricos por medio de las variables más importantes en la intención de compra de medicamentos, empleando técnicas de clasificación[6, 7]; y 3) elaborar un diagnóstico de riesgos percibidos por los usuarios consumidores de medicamentos genéricos y el uso de estos por medio de la norma ISO 31000 [9, 11].

Hoy en día, los medicamentos constituyen un procedimiento terapéutico utilizado por los profesionales de la salud [4]. Prescribir, dispensar o sugerir su consumo se ha convertido en una práctica social muy frecuente para médicos y paciente. Es por eso por lo que, en la industria farmacéutica los medicamentos genéricos se han vuelto importantes debido a la gran disponibilidad de estos productos en el mercado y su bajo costo. Los consumidores se han visto afectados en sus finanzas, resultado de los altos y bajos de la economía a nivel mundial, alterando así sus hábitos de consumo por lo que han cambiado el medicamento comercial por un producto genérico y de menor valor. Además, estos medicamentos contienen el mismo principio activo que los medicamentos comerciales, haciéndolos más atractivos para el consumidor [8, 12].

El desarrollo de este proyecto tiene como finalidad establecer las causas que influyen en el consumo de medicamentos genéricos y diagnosticar un patrón de consumo, aplicando un instrumento estadístico como la minería de datos a los habitantes de la ciudad de Bucaramanga con el fin de evaluar qué porcentaje de la población consumen dichos medicamentos. Los resultados que se genere esta investigación servirán como base, en primer lugar, cuáles son los conocimientos que tiene la población sobre medicamentos genéricos y los factores determinantes de esta práctica.

La realización de este estudio beneficiara no solo a la comunidad sino también que dicha información puede ser utilizada para estudios posteriores que quiera realizar el ministerio de salud de la ciudad de Bucaramanga. Este conocimiento en el contexto local permitirá si existe la necesidad de realizar nuevas investigaciones en los diferentes estratos de la ciudad de Bucaramanga, al igual servirá de guía para proponer y creas estrategias que promuevan el adecuado uso de medicamentos genéricos, facilitando a las

personas minimizar cualquier impacto social negativo que dichos medicamentos puedan llegar a generar el uso inapropiado de medicamentos ya que puede producir efectos adversos y fatales, como envenenamiento o alergias.

Los medicamentos son esenciales para prevenir, aliviar o mejorar la salud y para la sobrevivencia de las personas. Tener acceso a ellos significa proteger el derecho a la vida que es esencial para la lucha contra las enfermedades[13, 14].

3. MÉTODO

3.1 Caracterización de la población

Para la caracterización de los usuarios que son consumidores de medicamentos genéricos en la ciudad de Bucaramanga se tuvo en cuenta las siguientes variables: género, estrato, percepción de confianza del medicamento genérico, entre otras. Lo anterior, con el objetivo de identificar la intención de compra de estos. Para la realización de este procedimiento se elaboró un Data Warehouse con la información recogida por medio de una encuesta que fue diligenciada por 384 personas mayores de 18 años.

3.1.1 Género

Con relación al género de las personas encuestadas se observó un 50,8% de Hombres y el 49,2% de mujeres (Figura 1).

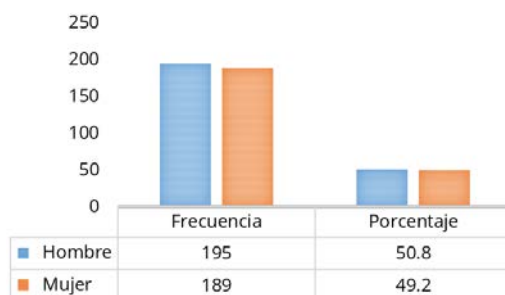


Figura 1. Género de la población encuestada

3.1.2 Estrato

El segmento de la población bumanguesa estudiada corresponde un 63,8% al estrato 3, 34,9% al estrato 4 y el 1,3 % al estrato 5 (Figura 2).

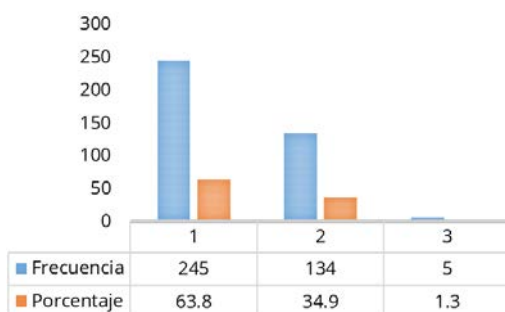


Figura 2. Estrato de la población encuesta

3.1.3 Son seguros y confiables los medicamentos genéricos

Al profundizar en el consumo de medicamentos genéricos se encontró que 80,6% de las personas le preocupa que el medicamento sea seguro y confiable, el 55,4 % cree que es muy probable obtener los resultados esperados al consumir el medicamento y una pequeña proporción equivalente al 10,9 % de la población no le causa temor no obtener los beneficios prometidos por el medicamento genérico (Tabla 1).

Tabla 1. Seguros y confiables

Opciones	Frecuencia	%	% Acumulado
Nunca	2	0.52	0.52
Pocas Veces	20	5.21	5.73
Regularmente	49	12.76	18.49
Casi siempre	188	48.96	67.45
Siempre	125	32.55	100.00
Total	384	100.00	

3.1.4 Los medicamentos genéricos son perjudiciales para la salud

El 50,5% de la población considera que los medicamentos genéricos no son perjudiciales para la salud lo que arroja un porcentaje mínimo de intranquilidad al comprar medicamentos genéricos que equivale a un 2,3% de la población. El 49,5% de la población no se preocupa por los posibles daños físicos que puedan tener al consumir medicamentos genéricos y el 57% de la población pocas veces se preocupan por si acertaron con su decisión de consumir un medicamento genérico. Teniendo en cuenta todos los aspectos tratados anteriormente el 46,1% considera que casi siempre es prudente la compra de medicamentos genéricos sin temor a que sus familiares y amigos piensen que escatima en la compra de medicamentos lo cual nos arrojó 78% y en cuanto a ser considerado poco prudente por personas cuya opinión valora el 78,4% respondió que nunca (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Perjudicial para la salud

Opciones	Frecuencia	%	% Acumulado
Nunca	194	50.52	50.52
Pocas Veces	58	15.10	65.63
Regularmente	98	25.52	91.15
Casi siempre	28	7.29	98.44
Siempre	6	1.56	100.00
Total	384	100.00	

Tabla 3. Escatimar

Opciones	Frecuencia	%	% Acumulado
Nunca	301	78.39	78.39
Pocas Veces	68	17.71	96.09
Regularmente	10	2.60	98.70
Casi siempre	5	1.30	100.00
Total	384	100.00	

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Correlación de Spearman

Se consideró importante realizar un análisis de correlaciones para determinar si existe una relación lineal entre las variables [3]. Es decir, que exista una relación estadísticamente significativa para esto se empelo la correlación de Spearman como se puede evidenciar en la siguiente tabla, posteriormente para el análisis de resultados se tuvo en cuenta la tabla de rangos que nos permite conocer el grado de asociación existentes entre las variables [5] (Tabla 4).

Tabla 4. Correlación de Spearman

Variable A	Variable B	Correlación
Seguro y Confiable	Beneficios	0.462
Buena inversión	Resultados esperados	0.3
Beneficios	Perjudicial para la salud	0.693
Buena inversión	Prudencia	0.453
Otras Marcas	Dinero gastado	0.558
Perjudicial para la salud	Daños físicos	0.916
Intranquilidad	Otras marcas	0.55
Incertidumbre	Intranquilidad	0.596

Prudencia	Otras marcas	-0.465
Escatimar	Intranquilidad	0.285
Poco prudente	Escatimar	0.825

4.2 Análisis de clúster

Es una técnica que se emplea para dividir los atributos en grupos con la cual se buscó capturar la estructura natural de estos, los cuales se dividieron de tal forma que pertenecen al mismo grupo son similares, y otros atributos pertenecen a diferentes grupos son diferentes[3][10]. En la tabla que se muestra a continuación se puede visualizar los atributos que predominaron en el segmento de la población bumanguesa estudiada, al cual se le realizaron dos iteraciones usando la herramienta Waikato Environment Knowledge Acquisition WEKA, que arrojó los siguientes clústeres: 1) la primera de ellas fue realizada con todos los atributos equivalente a 384 datos, 2) la segunda con 218 atributos que equivale a un 57%; y 3) la tercera iteración con 166 atributos que corresponde a un 43% (Figura 3).

```

Cluster centroids:
Attribute          Full Data          Cluster#
                   (384)              (218)              (166)
-----
Genero              1                  1                  2
Estrato             3.375             3.2018            3.6024
EPS                 6                 2                 6
Edad                32.6276           30.2706           35.7229
Oficio              2                 30                2
Profesion           10                5                 10
IngresoPromedim    1537.8388         1319.4037         1824.6988
Enfermedades       2                 2                 1
Enfermedadcritica  10                10                10
SeguroyConfiable   4                 4                 4
Resultadosesperados 4                 4                 3
Beneficios          2                 2                 4
Buena inversion     3                 3                 3
Otrasmarcas        2                 2                 2
Dinero gastado     2                 2                 2
Perjudicialparalasalud 1                 1                 3
Daños físicos      1                 1                 3
Intranquilidad     2                 2                 2
Incertidumbre      2                 2                 2
Prudencia           4                 4                 3
Escatimar           1                 1                 1
Pocoprudente      1                 1                 1
Gastopromedioenmedicamentos 44.401          16.2523           81.3675

Time taken to build model (full training data) : 0.05 seconds

=== Model and evaluation on training set ===

Clustered Instances
0      218 ( 57%)
1      166 ( 43%)

```

Figura 3. Clústeres (técnica para dividir los atributos en grupos)

En el primer clúster las variables predominantes fueron: género masculino, el estrato 3, Nueva EPS, la edad de 30 años, oficio ninguno, profesión estudiante, ingreso de \$1'319.403, la mayoría de la población no sufre de varias enfermedades, la enfermedad crítica la hipertensión, casi siempre les preocupa que el medicamento genérico sea seguro y confiable, casi siempre espera que buenos resultados, pocas veces les causa temor no obtener los beneficios prometidos, regularmente creen que una buena forma de invertir el dinero, pocas veces les preocupa que no sea una buena adquisición con respecto a otras marcas, pocas veces piensan en el dinero gastado en el medicamento, consideran que los medicamentos genéricos nunca serán perjudiciales para el consumo humano, nunca se preocupan por los posibles daños físicos que puedan traer el consumo de este tipo de medicamentos, pocas veces quedan intranquilos a la hora de comprar el medicamento genérico, son pocas las veces que les produce dudas si acertaron con su decisión de compra, casi siempre consideran prudente la compra de medicamentos genéricos, nunca piensan que escatiman ni les preocupa la opinión que tengan los demás a la hora de comprar medicamentos genérico, por último encontramos que tienen un gasto promedio en medicamentos de \$16.252.

En el segundo clúster los datos que predominaron fueron: género femenino, el estrato 4, la EPS que predominó fu Coomeva, la edad de 36 años, oficio independiente, profesión médico, ingreso de \$1'624.698, la mayoría de la población si sufre de varias enfermedades, la enfermedad crítica la hipertensión, casi siempre les preocupa que el medicamento genérico sea seguro y confiable, regularmente espera que buenos resultados, casi siempre les causa temor no obtener los beneficios prometidos, regularmente creen que una buena forma de invertir el dinero, pocas veces les preocupa que no sea una buena adquisición con respecto a otras marcas, pocas veces piensan en el dinero gastado en el medicamento, consideran que los medicamentos genéricos regularmente son perjudiciales para el consumo humano, por lo que regularmente se preocupan por los posibles daños físicos que puedan traer el consumo de este tipo de medicamentos, pocas veces quedan intranquilos a la hora de comprar el medicamento genérico, son pocas

las veces que les produce dudas si acertaron con su decisión de compra, regularmente consideran prudente la compra de medicamentos genéricos, nunca piensan que escatiman ni les preocupa la opinión que tengan los demás a la hora de comprar medicamentos genérico, por ultimo encontramos que tienen un gasto promedio en medicamentos de \$81.367.

4.3 Reglas de asociación

Se consideró importante aplicar las reglas de asociación en WEKA con el algoritmo *a priori* [3, 10]. El cual permitió encontrar las combinaciones entre los atributos y cuáles de estas ocurren con mayor frecuencia, obteniendo las siguientes reglas (Figura 4).

```
Best rules found:
1. Enfermedadcritica=10 209 ==> Enfermedades=2 209   conf:(1)
2. Enfermedades=2 209 ==> Enfermedadcritica=10 209   conf:(1)
3. Incertidumbre=2 Escatimar=1 181 ==> Pocoprudente=1 181   conf:(1)
4. Enfermedadcritica=10 Pocoprudente=1 173 ==> Enfermedades=2 173   conf:(1)
5. Enfermedades=2 Pocoprudente=1 173 ==> Enfermedadcritica=10 173   conf:(1)
6. Enfermedadcritica=10 Escatimar=1 169 ==> Enfermedades=2 169   conf:(1)
7. Enfermedades=2 Escatimar=1 169 ==> Enfermedadcritica=10 169   conf:(1)
8. Perjudicialparalasalud=1 Pocoprudente=1 169 ==> Escatimar=1 169   conf:(1)
9. Enfermedadcritica=10 Escatimar=1 Pocoprudente=1 168 ==> Enfermedades=2 168   conf:(1)
10. Enfermedades=2 Escatimar=1 Pocoprudente=1 168 ==> Enfermedadcritica=10 168   conf:(1)
11. Dañosfisicos=1 Escatimar=1 164 ==> Pocoprudente=1 164   conf:(1)
12. Perjudicialparalasalud=1 Dañosfisicos=1 Pocoprudente=1 159 ==> Escatimar=1 159   conf:(1)
13. Perjudicialparalasalud=1 Dañosfisicos=1 Escatimar=1 159 ==> Pocoprudente=1 159   conf:(1)
14. Perjudicialparalasalud=1 Escatimar=1 170 ==> Pocoprudente=1 169   conf:(0.99)
15. Enfermedades=2 Escatimar=1 169 ==> Pocoprudente=1 168   conf:(0.99)
16. Enfermedadcritica=10 Escatimar=1 169 ==> Pocoprudente=1 168   conf:(0.99)
17. Enfermedades=2 Enfermedadcritica=10 Escatimar=1 169 ==> Pocoprudente=1 168   conf:(0.99)
18. Enfermedadcritica=10 Escatimar=1 169 ==> Enfermedades=2 Pocoprudente=1 168   conf:(0.99)
19. Enfermedades=2 Escatimar=1 169 ==> Enfermedadcritica=10 Pocoprudente=1 168   conf:(0.99)
20. Dinero gastado=2 Escatimar=1 165 ==> Pocoprudente=1 164   conf:(0.99)
```

Figura 4. Reglas de asociación (permitted encontrar las combinaciones entre los atributos)

Para el análisis e interpretación de las reglas de asociación se tiene en cuenta el nivel de confianza y la cobertura luego se procedió a tomar las asociaciones más importantes para el objetivo de este proyecto.

- 209 personas que dijeron que no sufrían de varias enfermedades no padecen ninguna enfermedad crítica con un nivel de confianza del 100%.
- 181 personas les produce poca duda sobre si acertaron con su decisión de compra, por lo que nunca piensan que escatiman en la compra de sus medicamentos ni que los demás piensen que son pocos prudentes a la hora de comprarlos con un nivel de confianza del 100%.
- 169 personas sumen que nunca escatiman en la compra de sus medicamentos ya que no tienen ninguna enfermedad crítica y es muy esporádica la compra de medicamentos con un nivel de confianza del 100%.

5. CONCLUSIONES

Académicamente esta investigación proporciona conocimiento nuevo y valido sobre la intención de compra de medicamentos genéricos en la ciudad de Bucaramanga, se aplicó la metodología Data Warehouse mediante la cual se elaboró un almacenaje de datos para la caracterización de los usuarios consumidores, analizando los 23 atributos que se obtuvieron a través del software WEKA. Según las encuestas realizadas los usuarios consideran estos fármacos seguros y confiables ya que poseen el mismo principio activo que los medicamentos comerciales.

Se evidencio la aceptación de los medicamentos por parte de los usuarios generando un crecimiento en el consumo de estos debido a que estos pueden ser adquiridos a un menor costo.

Se utilizó los estándares de la norma ISO 31000 y la guía de riesgos del departamento de la función pública para la elaboración de la matriz de riesgos percibidos por los consumidores de medicamentos genéricos, la cual dio un nivel de impacto bajo debido a que estos no son perjudiciales para su salud (Tabla 5).

Recomendaciones

Es necesario extender la investigación sobre los hábitos y valores de los consumidores de medicamentos genéricos a los estratos 1 y 2 de la ciudad de Bucaramanga para tener datos concretos sobre del tema generándose la matriz de riesgos y la caracterización de este segmento de la población.

Realizar campañas de salud a la población sobre la composición de los medicamentos genéricos y el beneficio que estos tienen ya que son más asequibles por su bajo costo.

Revisar la viabilidad de la aplicación de otras variables tales como gravedad de la enfermedad o dolencia, tiempo vs cantidad de fármaco, entre otras.

Tabla 5. Matriz de Riesgo

Proceso: Consumo de Medicamentos Genéricos									
Objetivo: Diagnosticar los Riesgos Percibidos por los Usuarios Consumidores de Medicamentos Genéricos									
Causas	Riesgo	Descripción Consecuencias Potenciales	Causas Potenciales	P	C	V	Interpretación	Matriz de Calor	Acciones
No cuenta con la mismas proporciones del principio activo	Funcional	El producto no tenga el desempeño esperado	Comprar otra marca	1	1	1	Se toma en cuenta la opción de un regente en farmacia. El regente verifica que los medicamentos genéricos, al tener el mismo principio activo que el medicamento comercial, puedan generar un buen resultado en el tratamiento.	Muy bajo	Brindar información a los usuarios sobre los beneficios que puede tener el consumo de medicamentos genéricos; ya que estos poseen el mismo principio activo que los medicamentos comerciales.
Efectos secundarios como neurológicos, digestivos, dolor, etc.	Físico	Peligro que el producto implica para uno mismo	No volver a consumir medicamentos genéricos	1	2	2	Los usuarios creen que es muy poco probable que el consumo de medicamentos genéricos les genere algún efecto secundario. Si el producto está a la venta, es porque es apto para el consumo.	Muy bajo	Recomendar leer, siempre, las contraindicaciones que tiene el medicamento genérico.
Mal estado del producto	Financiero	Que el producto no valga lo que cuesta	Comprar otra marca	3	3	9	Generalmente los usuarios relacionan la calidad del producto con el precio de estos.	Moderado	Generar conciencia sobre la composición química que tienen los medicamentos genéricos y los medicamentos comerciales.
Malos cometarios realizados por otras personas sobre el medicamento	Social	Decisión errónea sobre el producto	No recomendar el medicamento	1	4	4	Los usuarios generalmente poco les interesa la opinión que tengan los demás sobre cómo invertir su dinero en la compra de medicamentos	Bajo	Que los usuarios entiendan que la decisión al comprar un medicamento no debe estar sujeta a la opinión de terceras personas.
El usuario percibe que el medicamento no le hace bien a su salud	Psicológico	Decisión equivocada afecte el ego del consumidor	No volver a comprar el medicamento	2	3	6	Pocos usuarios quedan con la sensación que se equivocan a la hora de escoger comprar el medicamento genérico en lugar del medicamento comercial	Bajo	Buscar asesoría sobre cuál es la mejor opción al comprar un medicamento

REFERENCIAS

- [1] A. G. Arieta, C. A. Solá, and C. H. García. "Medicamentos genéricos: evidencias y mitos," *Información Terapéutica del Sistema Nacional de Salud*, vol. 34, n. 3, pp. 71-82, 2010.
- [2] F. E. Carrizo. "Estudios de bioequivalencia: enfoque metodológico y aplicaciones prácticas en la evaluación de medicamentos genéricos," *Revista Médica del Uruguay*, vol. 16, n. 2, pp. 133-143, septiembre 2000.
- [3] R. García, "*Minería de datos para la toma de decisiones e inteligencia de negocios: aplicaciones en la mercadotecnia*," Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2012.
- [4] R. Guerrero, A. I. Gallego, V. Becerril-Montekio, and J. Vásquez. "Sistema de salud de Colombia," *Salud Pública de México*, vol. 53, n. 2, pp. s144-s155, 2011.
- [5] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista. *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill, 2006.
- [6] N. Homedes, and A. Ugalde. "Multisource drug policies in Latin America: survey of 10 countries," *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 83, pp. 64-70, January 2005.
- [7] L. E. Jaramillo, J. Orozco, R. Sánchez, M. L. Cárdenas, and O. García. *Estudio sobre uso y prescripción de medicamentos en cinco ciudades colombianas*. Bogotá: Ministerio de la Protección Social-Universidad Nacional de Colombia, 2005.
- [8] C. J. Jiménez Prager, and O. A. Parra Echeverry, "*FT, La encrucijada de una exitosa marca de genéricos: caso de estudio*," Tesis de Maestría, Universidad Icesi, Cali, Valle del Cauca, Colombia, 2012.
- [9] J. Puig-Junoy. "Los medicamentos genéricos pagan el precio de ser referencia," *Revista de administración sanitaria siglo XXI*, vol. 2, pp. 35-60, marzo 2004
- [10] G. L. Martínez Luna. "Minería de datos: Cómo hallar una aguja en un pajar," *Revista Ciencia*, vol. 62, n. 3, pp. 55-63, 2011.
- [11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. "NTC-ISO 31000:2018. Gestión del Riesgo, Principios y Directrices", ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2018
- [12] A. Sarmiento. "Desarrollo de medicamentos, patentes y acceso a medicamentos," en *Salud pública – perspectivas*, Ed. Academia Nacional De Medicina, 2011, pp. 20-40.
- [13] F. Tobar. "Economía de los medicamentos genéricos en América Latina," *Revista Panameña de Salud Pública*, vol. 23, n. 1, pp. 59-67, 2008.
- [14] V. Baos Vicente. "La calidad en la prescripción de medicamentos," *Información Terapéutica del Sistema Nacional de Salud*, vol. 23, n. 2, pp. 45-54, 1999.

Configuración de una red de prestadores de servicios en salud para zonas urbanas utilizando herramientas de programación matemática

Juan José Hernández-Sánchez¹
Edgar Leonardo Duarte-Forero²

¹ *Universidad de la Sabana*

² *Universidad Libre*
Colombia

Los problemas de localización de instalaciones médicas incluyen en sus objetivos procurar mayor equidad y mejorar en el acceso a la atención médica. Una de sus aplicaciones más específicas busca asegurar que exista una cobertura apropiada para los habitantes de una región, con el fin de tener acceso a un sistema de salud. En este trabajo se plantea la configuración de una red de prestadores de servicios en salud para zonas urbanas, analizando la relación entre cobertura y costos fijos para el administrador de la red. Se presenta una solución al problema con herramientas de programación matemática (programación entera mixta) con el objetivo de maximizar la cobertura. El modelamiento resultante se aplica en un caso de estudio: diseño de una red de centros de detección y prevención para tratamiento cognitivo conductual a pacientes con obesidad infantil en la ciudad de Bogotá, Colombia. Los resultados evidencian la posibilidad hacer una reducción en las instalaciones disponibles y mantener niveles de cobertura aceptables.

¹ Ingeniero Industrial.

Contacto: juanhersan@unisabana.edu.co

² Ingeniero Industrial.

Contacto: edgarl.duarte@unilibre.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En esta investigación se pretende exponer desde la perspectiva académica un modelo de localización de instalaciones enfocadas en brindar un Tratamiento Cognitivo Conductual TTC a pacientes con diagnóstico de obesidad infantil. Para el modelo matemático se tomaron como referencia los modelos de Daskin [1] y de la revisión de literatura de Ahmadi-Javid [2]. Los autores contemplan un problema de cobertura máxima en función de restricciones como diferentes radios de cobertura, el número de instalaciones habilitadas y la demanda mínima y máxima que se deberá atender en dichas instalaciones.

En el área de salud, las instalaciones y servicios para los pacientes dependen de la distancia que existe entre el origen del paciente y la ubicación de la instalación asignada. Es probable que los pacientes no siempre sean asignados a la instalación más cercana a su ubicación. Por ello se asume que una asignación es *adecuada* si se encuentra dentro de un radio de cobertura e *inadecuado* en el escenario contrario.

Para el desarrollo de esta investigación, se establecen diferentes radios de cobertura, se contempla una variación en el número de instalaciones a habilitar, la capacidad con la que van a operar las instalaciones habilitadas, y de manera prioritaria, los pacientes que recibirán atención en la configuración de red de instalaciones que surja del modelo.

Se optó por realizar un proyecto enfocado al tratamiento y prevención de la obesidad infantil porque este es un padecimiento que en los últimos años ha tenido un incremento de pacientes con este diagnóstico. Para Colombia, considerando los datos que se tienen desde el año 2015 [3], se observa un aumento constante en el número de pacientes con obesidad infantil, y este es un problema que tiende a agravarse en los próximos años.

Considerando las observaciones previas, se hace necesario diseñar una red de instalaciones que brinden un tratamiento a estos pacientes y al mismo tiempo se promueva la prevención, para que otros niños y adolescentes no lleguen a ser pacientes. Se quiere dar atención al mayor número de pacientes, a una distancia adecuada y con costos adecuados para el administrador de la red.

Los problemas de localización de instalaciones médicas plantean diferentes objetivos para su desarrollo. Para comenzar se considera el acceso a las instalaciones, tema crucial y prioritario sobre todo en el ámbito de la planeación gubernamental. Otro de los objetivos consiste en definir las medidas de acceso a la atención médica, posterior a esto, mejorar el acceso a las instalaciones médicas.

Recientemente se ha buscado una mejora en la equidad del acceso a la atención médica, por lo que se ha impulsado la investigación sobre la asignación razonable de instalaciones de atención médica. Adicionalmente, la reducción de costos, el incremento en la flexibilidad para la selección de la ubicación de un servicio y el número de personas dentro de una distancia de viaje aceptable por lo menos a una instalación son temas que se investigan cada vez con mayor frecuencia [4].

Con respecto a la obesidad infantil, en la actualidad existe una falta de consenso en la práctica clínica sobre cómo se debe manejar. Aunque es evidente que las estrategias terapéuticas efectivas deberían tener el conocimiento de que esta es una enfermedad multifactorial, en la cual la disfunción metabólica es generalizada, multifacética, interdependiente y se basa en la interacción entre numerosas fuerzas genéticas y ambientales [5]. Específicamente en la niñez, se considera como un periodo crítico para realizar medidas de prevención, ya que en esta etapa se presentan un gran número de factores de riesgo implicados en la etiología de la obesidad (Figura 1), principalmente en el contexto familiar [6].

Para la intervención al estilo de vida de los pacientes existe la opción de implementar un Tratamiento Cognitivo Conductual TCC en clínicas especializadas para el tratamiento de la obesidad. El TCC es un tratamiento que se enfoca en establecer y mantener una conducta alimentaria adecuada, además de modificar los hábitos de vida del paciente que repercuten en la obesidad. Los elementos terapéuticos del TCC son: 1) la motivación y la psicoeducación, 2) las técnicas conductuales, 3) la reestructuración cognitiva,

4) la imagen corporal, la autoestima y la impulsividad, 5) las demandas afectivas, la resolución de problemas o la sintomatología depresiva, y 6) el entrenamiento y fortalecimiento de las técnicas de autocontrol y de las habilidades sociales. Lo anterior permite que el paciente descubra nuevas conductas para que, incorporándolas a su vida diaria, tenga como resultado un mayor bienestar y eficacia [8].

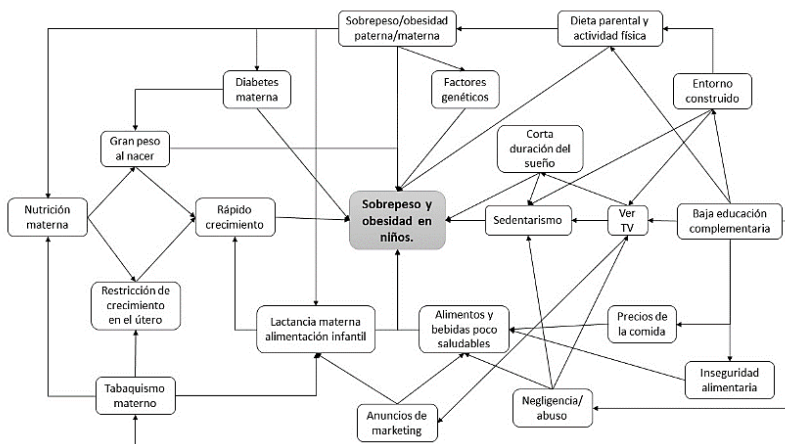
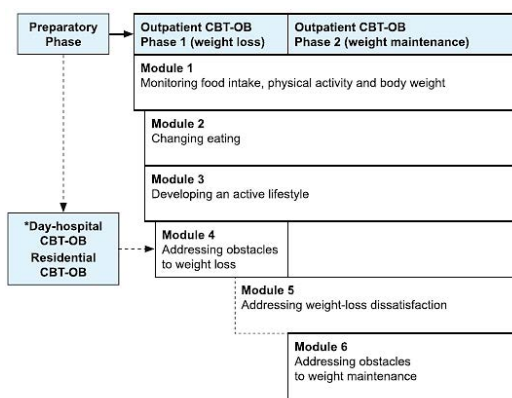


Figura 1. Determinantes de sobrepeso y obesidad infantil [7]

Los principales objetivos de TCC son ayudar a los pacientes a alcanzar, aceptar y mantener una cantidad saludable de pérdida de peso (es decir, del 5% al 10% de su peso corporal inicial), adoptar y mantener un estilo de vida propicio para el control de peso; y desarrollar una *mentalidad de control de peso* estable. Los especialistas del TCC adoptan un estilo terapéutico diseñado para desarrollar y nutrir una relación de trabajo colaborativo (el terapeuta y el paciente trabajan juntos como un equipo).

Para que el tratamiento sea efectivo se apoya en estrategias y procedimientos cognitivos específicos, principalmente involucrar a los pacientes para que hagan del tratamiento una prioridad y desempeñen un papel activo en el cambio de sus propios hábitos de actividad física y alimentación [9].

El TCC se realiza en seis módulos (Figura 2), cada uno de los cuales incluye estrategias y procedimientos específicos que pueden adaptarse al progreso y las barreras individuales del paciente. Los seis módulos se presentan de manera flexible e individualizada, de acuerdo con las necesidades del paciente.



*Patients treated in day-hospital or residential CBT-OB start the first three weeks of Phase 1 in these intensive settings and then continue the treatment with the Module 4 of outpatient CBT-OB

Figura 2. Mapa de la terapia cognitivo-conductual para la obesidad [9]

Desde el 2015, en Colombia se reporta un incremento en el número de pacientes con obesidad infantil, con una tasa de crecimiento anual promedio del 23,7%. De mantenerse esa tendencia, los casos para el año 2025 estarán por encima de los 400.000 (Figura 3). Para categorizar a la población de pacientes con obesidad infantil bajo los lineamientos del Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia UNICEF, y apoyado en los quinquenios del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, se clasificó a los pacientes en los rangos de edad 0-4 años y de 5-19 años, con el propósito de identificar como ha sido el comportamiento de estas poblaciones en específico en los últimos 5 años (Figura 4).

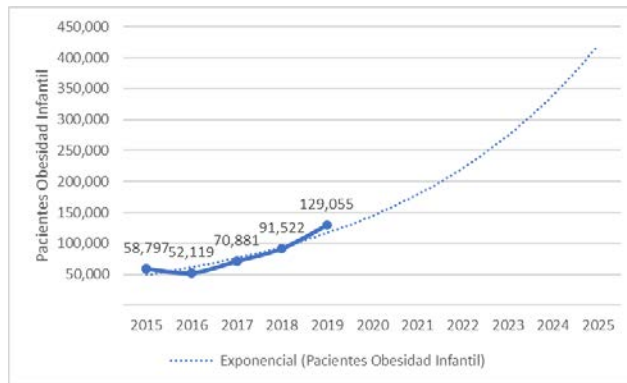


Figura 3. Proyección de Número de pacientes colombianos con diagnóstico de Obesidad Infantil [3]

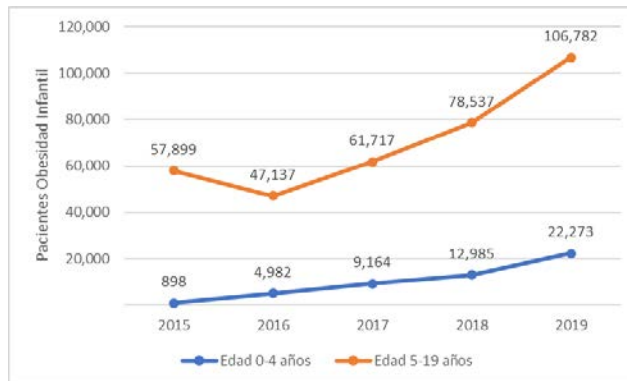


Figura 4. Número de pacientes colombianos con diagnóstico de Obesidad Infantil seccionados por rangos de edad. [3]

El sistema de salud de Colombia establece que todos los habitantes deben estar afiliados a una Entidad Promotora de Salud EPS, las cuales son responsables de la afiliación y registro de los afiliados. Cada EPS cuenta con una red de Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud IPS, entidades, asociaciones y/o personas bien sean, públicas, privadas o con economía mixta que hayan sido aprobadas para prestar de forma parcial o total los procedimientos que se demanden con ocasión de cumplir con el POS. Entre las funciones de las IPS está el prestar los servicios en su nivel de atención correspondiente a los afiliados y beneficiarios.

Bogotá es la ciudad colombiana con la mayor cantidad de pacientes con obesidad infantil. En 2019, estos pacientes se atendieron en diferentes EPS, y para el desarrollo de esta investigación se tomó como caso de estudio la EPS con el código EPS017. Los pacientes adscritos a esta EPS fueron atendidos en 94 centros de servicio diferentes, entre IPS y profesionales independientes, los cuales se encuentran ubicados en diferentes puntos de la ciudad de Bogotá (Figura 5). Bogotá cuenta con una subdivisión por localidades y estas a su vez se subdividen en Unidades de Planeamiento Zonal UPZ. La demanda fue estimada a partir de la distribución de densidad poblacional (Figura 6) por UPZ.

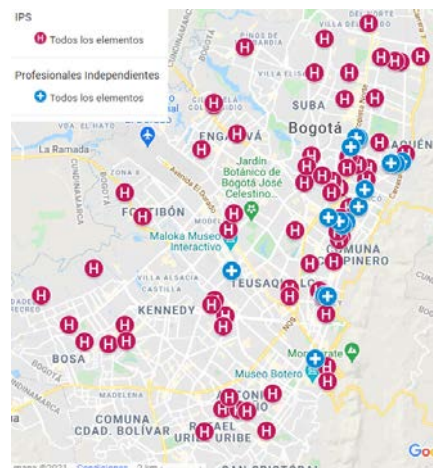


Figura 5. Localización actual de la oferta de servicios de la EPS017

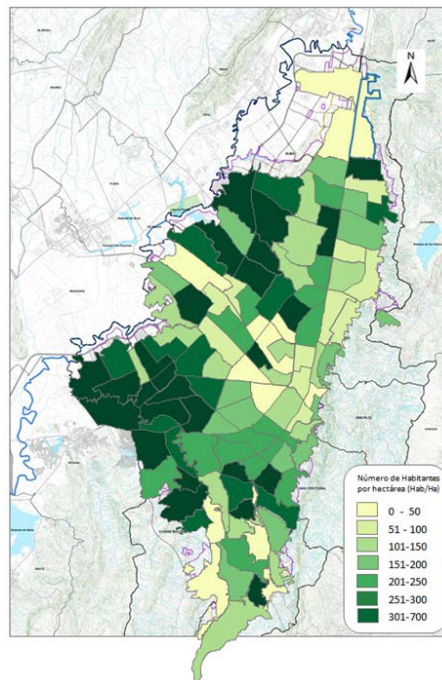


Figura 6. Densidad de personas por hectárea, según UPZ [10]

Este proyecto busca proponer una herramienta que facilite la toma de decisiones para alcanzar una cobertura máxima de pacientes diagnosticados con obesidad infantil, localizando de manera óptima instalaciones que les brinden el servicio y tratamiento que requieren, y responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo tomar decisiones para la localización de centros de servicios para la atención de la obesidad infantil bajo los requerimientos del Tratamiento Cognitivo Conductual?

Con el desarrollo de esta investigación se espera proponer un modelo que dé apoyo en la toma de decisiones para la localización estratégica de Centros de Detección y Prevención, esperando que estos den una amplia cobertura a los pacientes, tengan un acceso equitativo y se le brinde un servicio de calidad.

2. MÉTODO

Se construyó un modelamiento matemático para el diseño de una red de instalaciones enfocadas en brindar el TCC. Debido a que los niños dentro del rango de edad de 0-4 años no pueden seguir el mismo tratamiento que los niños y adolescentes que pertenecen al rango de edad de 5-19 años, se obtuvieron distintos diseños de red para estos dos grupos poblacionales. El modelo se desarrolló bajo un enfoque de Programación Entera Mixta y tiene los siguientes componentes:

2.1 Conjuntos

I: *Ubicación de los pacientes por UPZ*. Este conjunto de datos determina la ubicación de cada una de las 112 UPZ, estableciendo los baricentros como el punto de origen.

J: *La oferta actual de las IPS*. Solo se consideran las 94 IPS que pertenecen a la EPS017.

2.2 Parámetros

h_i : *La demanda de pacientes en cada UPZ $i \in I$* . Este parámetro secciona la densidad demográfica por UPZ. Para 2019, la EPS017 reporta una atención total anual de 7.402 pacientes dentro del rango de edad de los 0 hasta los 19 años. Se realizó una estimación estableciendo que la demanda total de pacientes en el rango de 0-4 años es de 563 y la demanda total de pacientes de 5-19 años es de 6.840 [3].

D_{ij} : *La distancia de viaje desde cada UPZ $i \in I$ a los CDP $j \in J$* . La distancia de viaje se establece como el trayecto en kilómetros que deben realizar los pacientes desde su origen (baricentros de las UPZ) hasta las

diferentes instalaciones en las que podrían realizar el tratamiento. El cálculo de estas distancias se realizó utilizando la fórmula de Haversine. Una vez hecha la tabla de distancias se encontró que la distancia de viaje máxima razonable que tiene que recorrer un paciente para recibir atención médica en Bogotá y adscrito a esta EPS es de casi 11 km.

w_j : *Demanda mínima para habilitar un CDP $j \in J$.* Se realizó una estimación de un salario mensual fijo de \$6.000.000,00. También fue necesario estimar el costo de consulta a cargo de los pacientes y la demanda mínima para alcanzar punto de equilibrio. Los pacientes de 0-4 años requieren ir una vez al mes al Centro de Detección y Prevención (CDP) y pueden ser atendidos por un pediatra [11], y la demanda mínima se estableció en 150 pacientes mensuales. En el caso de los niños y adolescentes de 5-19 años requieren de una visita semanal al CDP [11] debido a que reciben una consulta alternada entre un activador físico, un pediatra, un psicólogo y un nutriólogo por lo que la demanda mínima es de 139 pacientes semanales.

b_j : *La capacidad máxima de atención de los CDP $j \in J$.* Este parámetro establece un límite máximo a la demanda atendida. Para el modelo matemático se considera la capacidad de atención de los CDP basado en la jornada laboral del personal médico y que no debe de sobrepasar las 66 horas semanales conforme a la ley 269 de 1996 de Colombia [12]. Considerando la frecuencia de consulta y la jornada laboral de los especialistas se estableció una capacidad máxima de atención de 381 pacientes al mes para pacientes de 0-4 años y capacidad máxima de atención de 264 pacientes a la semana para los pacientes de 5-19 años.

p : *El número máximo de CDP que se habilitarán para la atención de pacientes.* Este parámetro tuvo una variación en función de porcentaje de la capacidad instalada que va desde el 10% hasta el 100%, con el fin de someter el modelo a diferentes escenarios y conocer si era necesario mantener la apertura de todos los centros o se podían alcanzar porcentajes aceptables de cobertura solo con las instalaciones necesarias.

f_j : *Costo de habilitar un CDP $j \in J$.* Considerando el salario de los especialistas, el número de especialistas y la frecuencia con la que los pacientes requieren ir a consulta se estimaron dos costos fijos para la habilitación de instalaciones. El costo para habilitar una instalación para el tratamiento de pacientes de 0-4 años es de \$6.000.000,00 mensual por instalación, y de \$5.600.000,00 semanal por instalación para pacientes de 5-19 años.

2.3 Variables de Decisión

x_j : 1, si se habilita el servicio de un CDP candidato $j \in J$; 0, en caso contrario. Para esta variable se construyó una matriz binaria que trabaja en función de diferentes radios de cobertura donde se considera cada CDP como instalación candidata para atender la demanda dentro del radio establecido.

y_{ij} : 1, si los pacientes de una UPZ $i \in I$ se asignan a un CDP candidato $j \in J$; 0, en caso contrario. Con esta variable se logra que la demanda sea asignada solo a los CDP habilitados de la variable anterior, lo que contribuye a configurar diferentes redes de instalaciones modificando los radios de cobertura.

2.4 Restricciones

Radio de Cobertura: La distancia de viaje D_{ij} no debe ser superada de los límites del radio de cobertura. Este radio varía desde 1 km hasta los 11 km, establece la configuración de la matriz x_j .

Asignación: Demanda de cada UPZ $i \in I$ sea asignada a un solo CDP $j \in J$. Esta restricción asegura que la demanda solo sea asignada a un solo CDP y así conseguir una distribución de pacientes más equitativa. La configuración de esta restricción dentro del modelo se establece en la ecuación (1).

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Instalaciones: La apertura de instalaciones $j \in J$ será igual o menor al máximo propuesto p . Con esta restricción se evita que el modelo habilite más instalaciones de las que se solicita por lo que se buscará

atender la mayor demanda posible con límite de instalaciones a habilitar. La formulación está detallada en la ecuación (2).

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (2)$$

Capacidad: La demanda h_i nunca debe ser superior a la capacidad b_j de los CDP $j \in J$. La restricción de capacidad evita que la demanda no sea mayor a la capacidad calculada por CDP (ecuación 3), lo que realiza una configuración de red que no va a colapsar por sobrepoblación.

$$\sum_{i \in I} a_{ij} h_i y_{ij} \leq b_j x_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

Demanda: Tiene que existir un mínimo de demanda w_j para que se pueda habilitar un CDP. Para lograr que no se habiliten más CDP de los necesarios la restricción de demanda mínima, la cual tiene efecto en el diseño de una red más compacta y centralizada, estableciéndose con la ecuación (4).

$$\sum_{i \in I} a_{ij} h_i y_{ij} \geq w_j x_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

2.5 Función Objetivo

Cobertura: Maximizar la cobertura de los pacientes que habitan en las UPZ $i \in I$, con una óptima ubicación de los CDP $j \in J$. Esta función da como resultado el número total de pacientes que tendrán cobertura cumpliendo con las restricciones establecidas. También muestra los CDP habilitados y la demanda atendida en cada uno de ellos (ecuación (5)).

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij} h_i y_{ij} \quad (5)$$

Una vez que se obtuvo el resultado se realizó un cálculo del costo de instalación, con la finalidad de poder analizar en diferentes escenarios el costo de ofrecer atención a los pacientes adscritos a la EPS, y al mismo tiempo conocer la cantidad de CDP necesarios para brindar este servicio.

Costo instalación : Análisis el costo de instalación f_j habilitando solo los CDP $j \in J$ necesarios. El modelo matemático queda configurado considerando una función objetivo y seis conjuntos de restricciones de acuerdo con la descripción anterior. En el desarrollo de este proyecto, se aplicó el criterio de maximización de coberturas (ecuación (5)), mientras que el cálculo de distancias no fue objeto de optimización.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij} h_i y_{ij} \quad (5)$$

Todo se encuentra sujeto a las restricciones de las ecuaciones (6) a (13).

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij} h_i y_{ij} \leq b_j x_j \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij} h_i y_{ij} \geq w_j x_j \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \geq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

La restricción (10) sirve para que el modelo considere al menos la apertura de un CDP. La restricción (11) muestra que la demanda de las UPZ $i \in I$ solo estén cubiertos por CDP $j \in J$ abiertos. Finalmente, las restricciones (12) y (13) son de integridad de las variables de decisión. La Tabla 1 conjunta los parámetros que se explicaron previamente, con estos datos se muestra el escenario inicial que se habrá de comparar con los resultados que se obtengan de la ejecución del modelo matemático.

Tabla 1. Condiciones actuales de la EPS017

Criterio	Pacientes (0-4 años)	Pacientes (5-19 años)
Porcentaje de cobertura de pacientes	100%	100%
IPS utilizadas	94	94
Estimación de especialistas necesarios	94	376
Estimación de costo de instalación habilitada total	\$564.000.000,00 mensual	\$526.400.000,00 semanal
Distancia de viaje máxima considerable	10,9 km	10,9 km
Porcentaje promedio de pacientes con obesidad atendidos por IPS	4,62%	37,62%
Estimación de costo total para atención a pacientes con obesidad	\$25.944.000,00 mensual	\$198.031.680,00 semanal

Para la realización de los escenarios se considerarán 94 instalaciones para el tratamiento de 0-4 años, ya que esta cifra contempla a los especialistas independientes; en el caso del tratamiento de 5-19 años se considerarán 76 instalaciones, ya que se supone que las IPS cuentan con las condiciones para poder llevar a cabo el tratamiento a los pacientes. Los escenarios que se evaluarán en el modelo están descritos en la Tabla 2, posteriormente se realizará un análisis detallado de cada escenario.

Tabla 2. Parámetros de escenarios para ejecutar el modelo

Pacientes	Porcentaje de instalaciones disponibles (p)	Capacidad Máxima de pacientes por CDP (b)	Demanda mínima de pacientes por CDP (w)	Radio de cobertura (km)	Demanda de pacientes (h)	Costo apertura de CDP (f)
0-4 años	10%, 20%, 30%, 40%,	381 mensuales	150 mensuales	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	563 mensuales	\$6.000.000,00 mensuales
	50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%					
5-19 años		264 semanales	139 semanales	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	6.840 semanales	\$5.600.000,00 semanales

3. RESULTADOS

3.1 Solución Localización red de CDP para el tratamiento a pacientes de 0-4 años

Una vez se ejecutó el modelo con los parámetros correspondientes a este rango de edad se observa el porcentaje de demanda cubierta que se alcanza en diferentes radios de cobertura contra la capacidad instalada (Figura 7). El modelo solo se ejecutó solo hasta el 40% de capacidad debido a que ya no se presentaba una variación en los resultados.

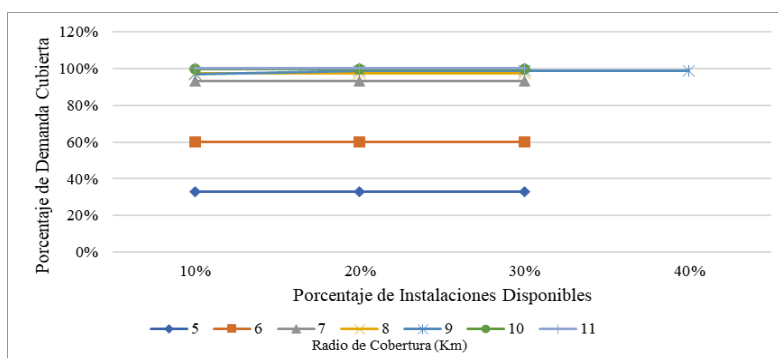


Figura 7. Cobertura para pacientes de 0-4 años versus instalaciones disponibles para varios radios de cobertura

La Tabla 3 muestra el porcentaje de demanda atendida con variación en el porcentaje de capacidad instalada y los radios de cobertura.

Tabla 3. Porcentaje de cobertura alcanzada para pacientes de 0-4 años dependiendo de la distancia de cobertura y las instalaciones disponibles

Radio en km	Porcentaje de instalaciones disponibles		
	10%	20%	30%
5	33.04%	33.04%	33.04%
6	60.04%	60.04%	60.04%
7	93.07%	93.07%	93.07%
8	97.34%	97.34%	97.34%
9	96.80%	98.76%	98.76%
10	99.82%	99.82%	99.82%
11	100.00%	100.00%	100.00%

Una vez realizada la ejecución del modelo y se obtuvieron los diferentes porcentajes de cobertura se procede a analizar el costo de cada evaluación (Figura 8).

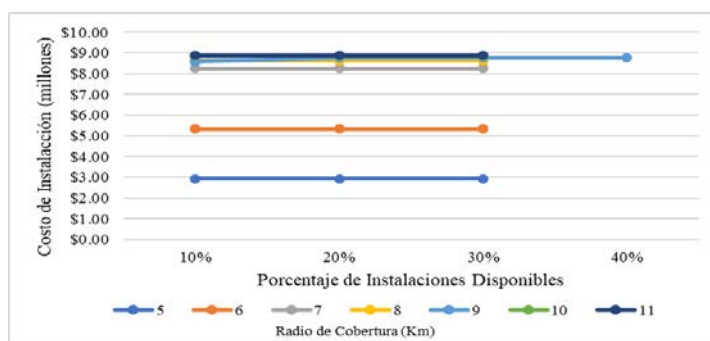


Figura 8. Costo de instalación de CDP para pacientes de 0-4 años versus capacidad de instalaciones para varios radios de cobertura

3.2 Solución Localización red de CDP para el tratamiento a pacientes de 5-19 años

De igual modo que el ejercicio anterior, el modelo se ajustó a los parámetros que se necesitaban para cumplir con los criterios de este rango de edad. En la Figura 9 se observa el comportamiento del porcentaje de cobertura sometido a la variación de la capacidad instalada, el modelo se ejecutó hasta el 60% de capacidad debido que en este punto no hubo variación en los resultados obtenidos.

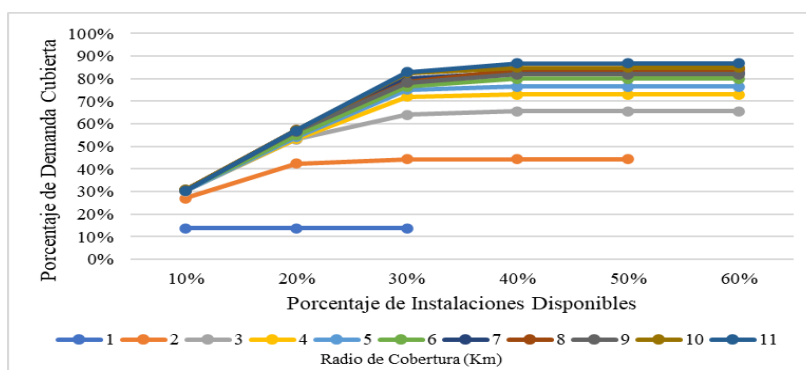


Figura 9. Cobertura para pacientes de 5-19 años versus capacidad de instalaciones para varios radios de cobertura

Para poder realizar un análisis del porcentaje de cobertura que se alcanza en los diferentes escenarios a los cuales es sometido el modelo, se cuenta con la Tabla 4, lo que nos permitirá realizar un análisis más específico.

Tabla 4. Porcentaje de cobertura alcanzada para pacientes de 5-19 años dependiendo de la distancia de cobertura y la capacidad instalada

Radio en km	Porcentaje de instalaciones disponibles					
	10%	20%	30%	40%	50%	60%
1	13.68%	13.68%	13.68%			
2	27.08%	42.44%	44.40%	44.40%	44.40%	

3	30.20%	53.06%	64.02%	65.64%	65.64%	65.64%
4	30.53%	53.27%	72.03%	72.98%	72.98%	72.98%
5	30.37%	54.12%	75.09%	76.55%	76.55%	76.55%
6	30.73%	54.80%	76.55%	80.07%	80.07%	80.07%
7	30.48%	57.27%	80.06%	82.65%	82.65%	82.65%
8	30.79%	57.16%	78.48%	84.11%	84.11%	84.11%
9	30.80%	56.55%	78.26%	81.90%	81.90%	81.90%
10	30.63%	57.11%	82.46%	84.77%	84.77%	84.77%
11	30.38%	57.02%	82.82%	86.77%	86.77%	86.77%

Una vez que se obtuvieron los resultados de cobertura se procedió a realizar el análisis de costo para cada escenario que se ejecutó en el modelo (Figura 10).

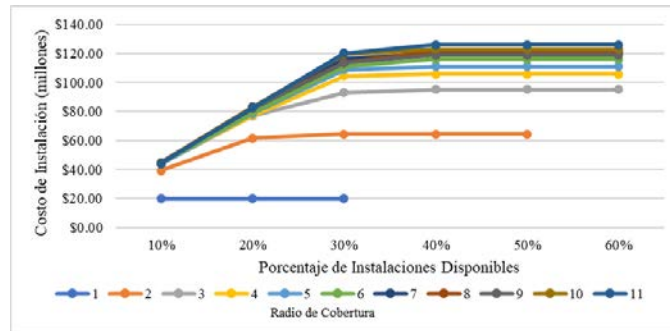


Figura 10. Costo de instalación de CDP para pacientes de 5-19 años versus capacidad de instalaciones para varios radios de cobertura

3.3 Solución Localización red de CDP para el tratamiento a pacientes de 5-19 años con aumento al doble en la capacidad de atención

Durante la ejecución del ejercicio anterior se detectó que algunas de las UPZ sobrepasaban la capacidad máxima de las instalaciones, por lo que el modelo no las consideraba. Por esta razón no se alcanzó una cobertura total. Para este escenario se modificó el parámetro de capacidad máxima (b), incrementándola hasta una atención máxima de 528 pacientes semanales, además de ajustar los parámetros correspondientes (Tabla 5).

Tabla 5. Ajuste de parámetros de escenarios para ejecutar el modelo para pacientes de 5-19 años

Pacientes	Parámetros					
	Porcentaje de instalaciones disponibles (p)	Capacidad Máxima de pacientes por CDP (b)	Demanda mínima de pacientes por CDP (w)	Radio de cobertura (km)	Demanda de pacientes (h)	Costo apertura de CDP (f)
*5-19 años	10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%	528 semanales	278 semanales	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	6.840 semanales	\$11.200.000,00 semanales

Una vez ejecutado el modelo con los nuevos ajustes la Figura 11 muestra que alcanzado una cobertura superior al 99% de pacientes, lo que demuestra que al aumentar la capacidad de atención el modelo contempla toda la demanda.

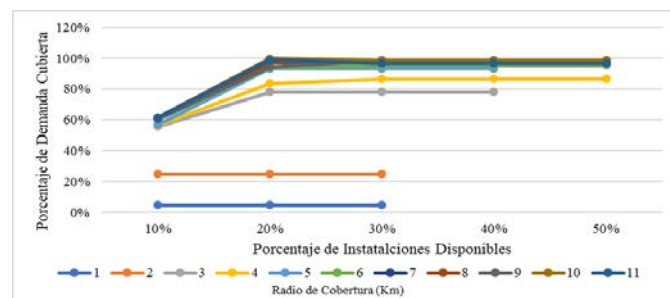


Figura 11. Cobertura para pacientes de 5-19 años versus capacidad de instalaciones para varios radios de cobertura con el aumento en la capacidad de atención

La Tabla 6 permite conocer la cobertura que se alcanza en cada escenario que se ejecuta el modelo y sus respectivos costos (Figura 12).

Tabla 6. Porcentaje de cobertura alcanzada para pacientes de 5-19 años dependiendo de la capacidad de atención aumentada, la distancia de cobertura y la capacidad instalada

Radio en km	Porcentaje de instalaciones disponibles				
	10%	20%	30%	40%	50%
1	4.72%	4.72%	4.72%		
2	24.93%	24.93%	24.93%		
3	55.61%	78.06%	78.06%	78.06%	
4	56.46%	83.77%	86.64%	86.64%	86.64%
5	56.84%	93.27%	93.27%	93.27%	
6	60.47%	94.14%	95.41%	95.41%	95.41%
7	61.26%	97.08%	97.02%	97.02%	97.02%
8	61.43%	97.34%	97.32%	97.32%	97.32%
9	60.54%	94.39%	98.58%	98.58%	98.58%
10	61.49%	99.78%	98.70%	98.70%	98.70%
11	61.48%	99.04%	96.75%	96.75%	96.75%

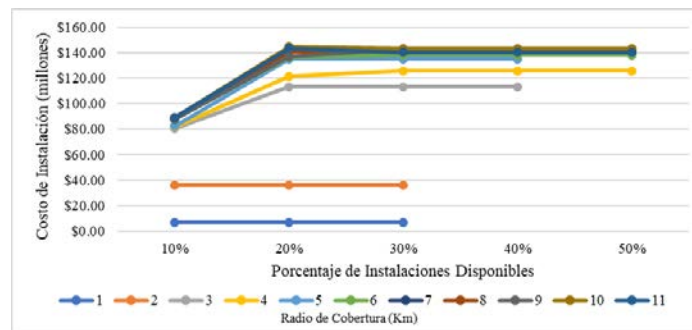


Figura 12. Costo de instalación de CDP para pacientes de 5-19 años versus capacidad de instalaciones para varios radios de cobertura con aumento en la capacidad de atención

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Buscando encontrar un equilibrio entre la cobertura, la distancia de viaje y el costo para la administración de la red de centros, se realizó un análisis a las posibles soluciones que podrían brindar los mejores resultados para todos los elementos que componen este sistema. Considerado que el caso de estudio está enfocado en Bogotá, el factor de distancia de viaje cobra relevancia al buscar que los pacientes tengan el acceso más próximo al servicio de salud.

4.1 Análisis de solución de localización de CDP para pacientes de 0-4 años

La Figura 7 muestra que con el 10% de la capacidad se alcanza a cubrir una demanda por arriba del 90%. Se decidió hacer el análisis con los radios de 7 km y 8 km, debido a que son los primeros en alcanzar una alta cobertura. Se ha realizado un análisis de cobertura y costos (Figura 13) de los radios de cobertura seleccionados. También se comparan los escenarios propuestos con el estado inicial (Tabla 7), donde se observa una considerable reducción en los costos de la red y en la distancia de viaje para los pacientes.

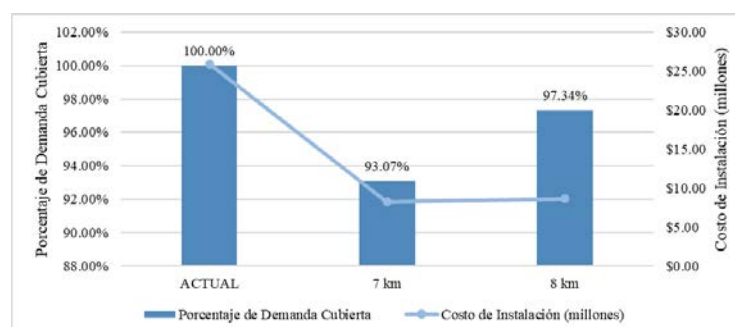


Figura 13. Porcentaje de demanda de pacientes de 0-4 años versus costo de instalación

Tabla 7. Análisis de estado actual de la red de IPS para pacientes de 0-4 años versus resultado del modelo

Criterio	Estado inicial (Radio 11 km)	Radio 7 km	Radio 8 km
Cobertura de pacientes	100%	93,07%	97,34%
Instalaciones habilitadas	94	3	3
Estimación de especialistas requeridos	94	3	3
Costo instalación habilitada	\$564.000.000,00 mensual	\$18.000.000,00 mensual	\$18.000.000,00 mensual
Total			
Porcentaje promedio de atención a pacientes con obesidad por IPS	4,62%	45,84%	47,94%
Estimación de costo total para atención a pacientes con obesidad	\$25.944.000,00 mensual	\$8.251.200,00 semanal	\$8.629.200,00 semanal

Se hace una comparación de cómo queda la configuración de la red de CDP con los escenarios propuestos versus el escenario inicial (Figura 14).

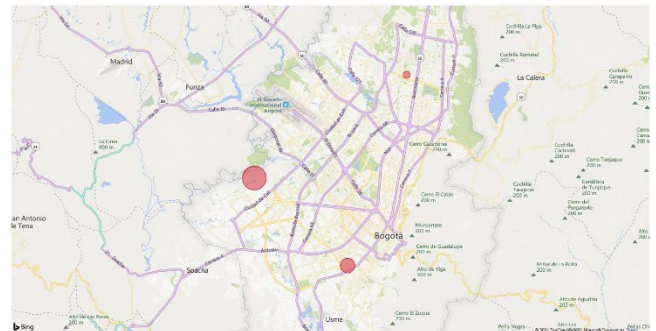
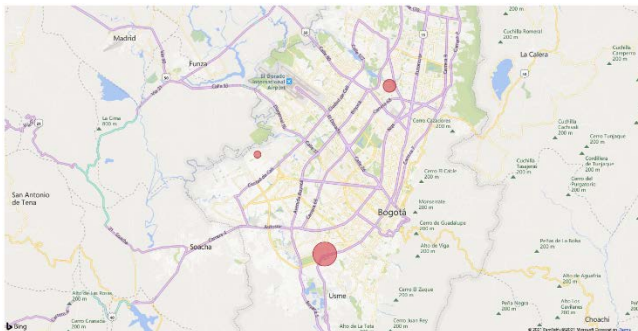
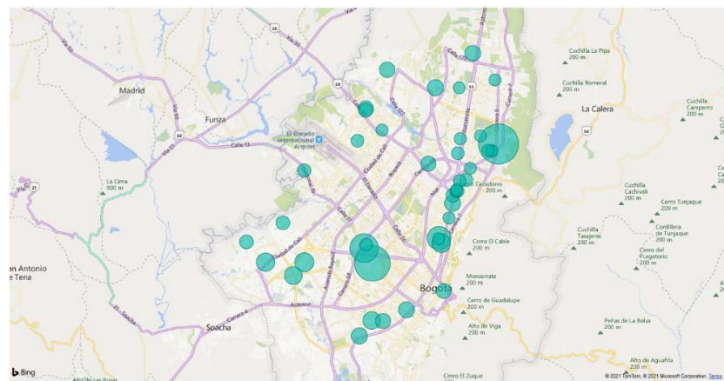


Figura 14. Comparación de la red inicial de CDP para el tratamiento de pacientes de 0-4 años versus los escenarios propuestos: con radio de cobertura de 7 km y con radio de cobertura de 8 km

4.2 Análisis de solución de localización de CDP para pacientes de 5-19 años

En el caso de este análisis al no alcanzar el 100% de cobertura se decidió trabajar con el primer radio que rebasará el 80% de demanda cubierta, como se muestra en la Figura 9. Este objetivo se logra con radios de 6 km y 7 km, habilitando solo 40% de la capacidad instalada. En el análisis de cobertura y costos (Figura 15) se observa una reducción en los costos para el administrador de la red (Tabla 8), sin embargo, como se expuso anteriormente, en este ejercicio hay un límite en porcentaje de demanda cubierta.

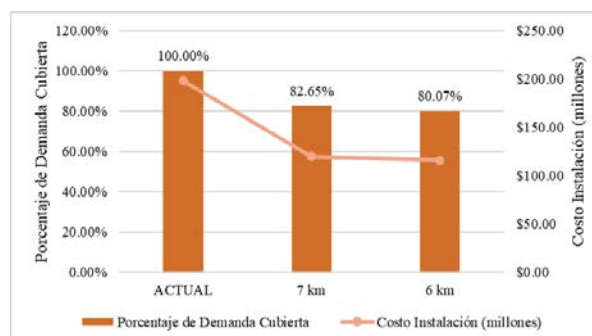


Figura 15. Porcentaje de demanda de pacientes de 5-19 versus costo de instalación

Tabla 8. Análisis de estado actual de la red de IPS para pacientes de 5-19 años versus resultado del modelo

Criterio	Estado inicial (Radio 11 km)	Radio 6 km	Radio 7 km
Cobertura de pacientes	100%	80,07%	82,65%
Instalaciones habilitadas	76	25	26
Estimado de especialistas requeridos	304	100	104
Costo instalación habilitada	\$526.400.000,00	\$140.000.000,00	\$145.600.000,00
Total	semanal	semanal	semanal
Porcentaje promedio de atención a pacientes con obesidad por IPS	37,62%	82,98%	82,36%
Estimación de costo total para atención a pacientes con obesidad	\$198.031.680,00 semanal	\$116.178.000,00 semanal	\$119.912.000,00 semanal

Se hace una comparación (Figura 16) de la configuración de red inicial con las que propone el modelo para analizar de manera gráfica como queda la distribución y asignación de los pacientes.

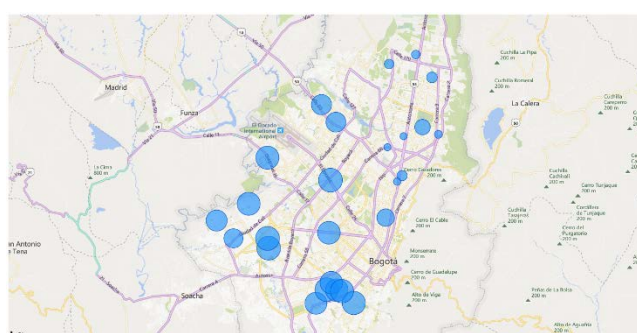
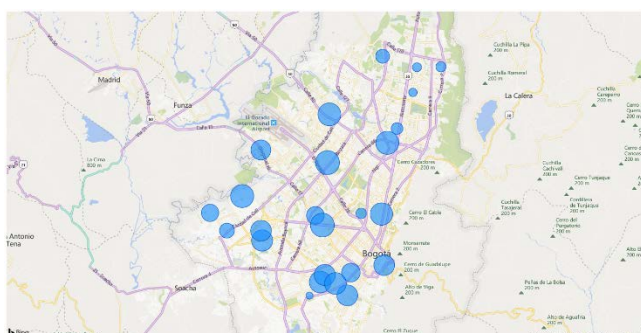
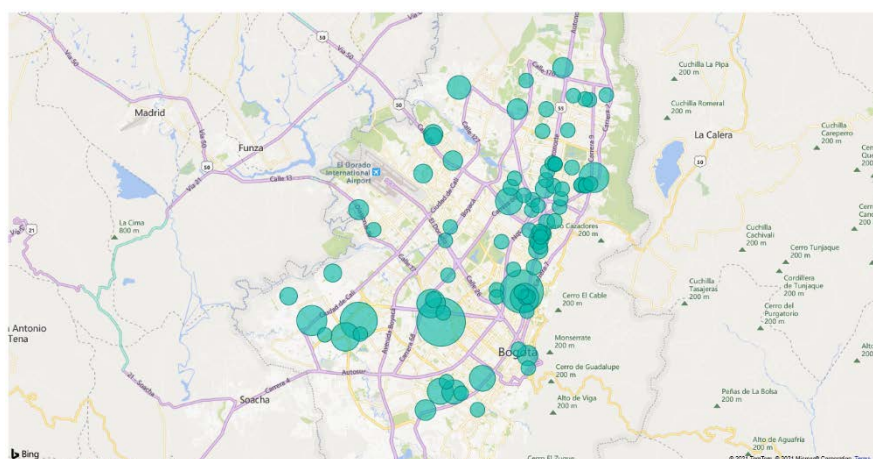


Figura 16. Comparación de la red inicial de CDP para el tratamiento de pacientes de 5-19 años versus los escenarios propuestos: con radio de cobertura de 6 km y con radio de cobertura de 7 km

4.3 Análisis de solución de localización de CDP para pacientes de 5-19 años con aumento en capacidad de atención

Debido a que el caso anterior presentaba una limitación en la cobertura de la demanda y como ya se expuso anteriormente se realizaron unos ajustes en los parámetros que permitieran dar cobertura total.

La Figura 11 evidencia que los radios de cobertura son más cortos y el porcentaje de demanda cubierta aumenta considerablemente. Se optó por realizar el análisis con los radios de cobertura de 5 km y 6 km.

Como se observa en la Figura 17 los costos semanales tienen un ligero incremento para el administrador de la red, al ajuste que se realizó, aunque el número de instalaciones requeridas disminuyó y el porcentaje de cobertura es más alto comparándolo con la proyección anterior.

La Tabla 9 muestra más a detalle la comparación de cada concepto inicial y los escenarios que resultaron de esta elección de radios de cobertura.

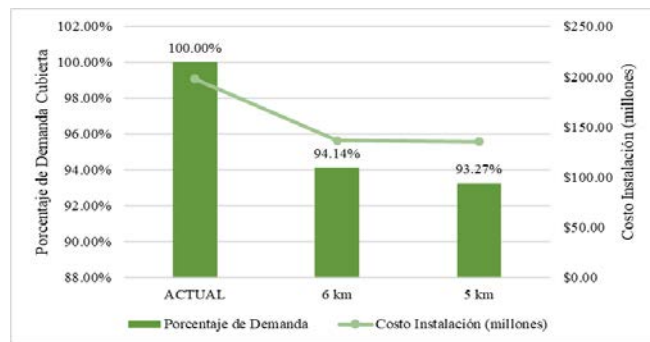


Figura 17. Porcentaje de demanda con capacidad aumentada para pacientes de 5-19 versus costo de instalación

Tabla 9. Análisis de estado actual de la red de IPS para pacientes de 5-19 años versus resultado del modelo con aumento en la capacidad de atención

Criterio	Estado inicial (Radio 11 km)	Radio 5 km	Radio 6 km
Cobertura de pacientes	100%	93,27%	94,14%
Instalaciones habilitadas	76	15	15
Estimado de especialistas requeridos	304	105	105
Costo instalación habilitada Total	\$526.400.000,00 semanal	\$168.000.000,00 semanal	\$168.000.000,00 semanal
Porcentaje promedio de atención a pacientes con obesidad por IPS	37,62%	80,56%	81,30%
Estimación de costo total para atención a pacientes con obesidad	\$198.031.680,00 semanal	\$135.333.000,00 semanal	\$136.584.000,00 semanal

Finalmente se compara la configuración de red inicial con la configuración resultante del modelo bajo los ajustes que se realizaron a los parámetros previos a su ejecución.

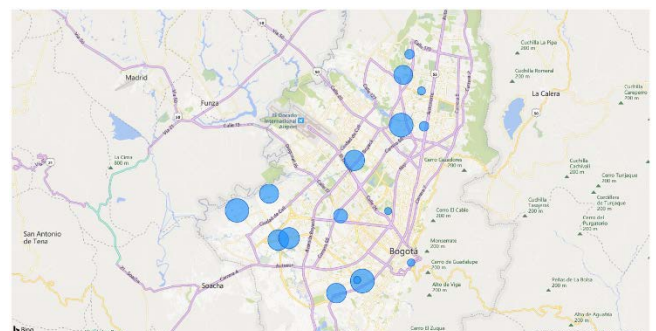
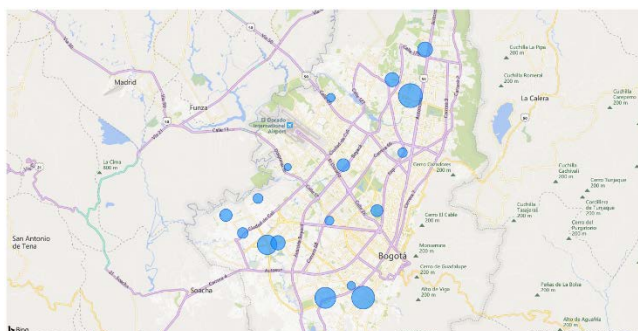
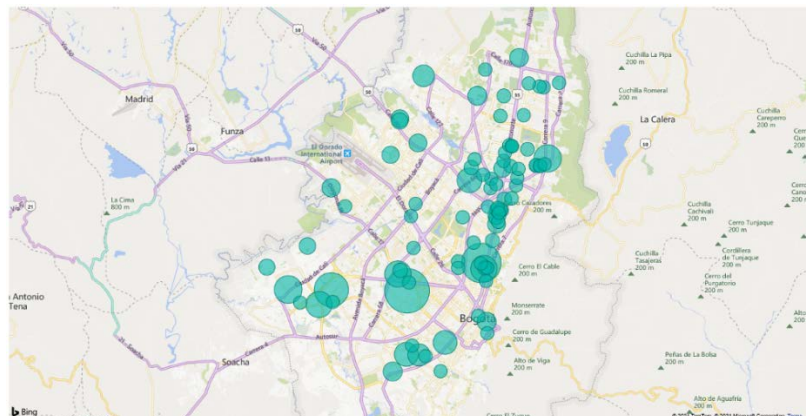


Figura 18. Comparación de la red inicial de CDP para el tratamiento de pacientes de 5-19 años vs los escenarios propuestos con el aumento en la capacidad de atención: con radio de de 5 km y con radio de de 6 km

5. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la implementación de un modelo matemático para la asignación y optimización de Centros de Detección y Prevención para la implementación de un Tratamiento Cognitivo Conductual para pacientes con diagnóstico de obesidad infantil. Este modelo fue construido bajo el enfoque de

programación entera mixta y la solución se obtuvo con el software GAMS. Los parámetros fueron obtenidos a partir del Sistema Integrado de Información de la Protección Social, el Registro de Prestadores de Servicios de Salud y la Secretaría Distrital de Planeación.

Se realizó la comparación del estado inicial de la red de prestadores de una aseguradora en particular (EPS017) con dos posibles escenarios para el tratamiento de pacientes dentro del rango de 0 a 4 años; también se presentan cuatro posibles escenarios para el tratamiento de pacientes de 5 a 19 años. Para estas estrategias fue fundamental considerar una distancia de viaje mínima para la asignación de los Centros de Detección y Prevención; también se estimó un costo operacional para tener un costo mínimo en la habilitación de las instalaciones, esto con el objetivo de obtener una amplia cobertura de pacientes en la ciudad de Bogotá adscritos a la Entidad Promotora de Salud antes mencionada.

Este modelo puede ser de utilidad para la toma de decisiones, ya que en un lapso corto y de una manera sencilla permite conocer la localización óptima de Centros de Detección y Prevención de la obesidad infantil, y podría ser una herramienta para brindar un mejor acceso y equidad a la población con este diagnóstico, ya que el Tratamiento Cognitivo Conductual es aplicable a cualquier tipo de obesidad [9].

Con la implementación de este modelo se puede observar que hay una máxima cobertura a los pacientes con diagnóstico de Obesidad infantil en diferentes escenarios, además, se puede evaluar la demanda cubierta de los Centros de Detección y Prevención con diferentes radios de cobertura, disminuyendo la dispersión y aumentando la concentración de pacientes a los centros habilitados. Este modelo también logra contribuir en la prestación de un servicio eficiente y de calidad para los pacientes, ya que se considera la capacidad de las instalaciones, por lo que se evita que la demanda sobrepase a la oferta.

Es importante mencionar que el modelo propuesto en esta investigación es una adaptación del modelo original de Daskin [1], y de los expuestos en la revisión de literatura de Ahmadi-Javid [2]. Los modelos originales solo consideran una función objetivo. En esta investigación se proponen objetivos de maximización de cobertura y minimización de distancias. La investigación permitió concluir que estos objetivos son de naturaleza conflictiva, y por lo tanto requieren análisis multiobjetivo y tratamientos posteriores para este tipo de relaciones.

Para una investigación futura donde se desee que este modelo brinde una localización más precisa de los Centros de Detección y Prevención se requiere conocer la Unidad de Planeamiento Zonal de la cual es originario el paciente, debido a que el Sistema Integrado de Información de la Protección Social solo proporciona el departamento del cual es originario el paciente. Para esta investigación se realizó una estimación basada en la densidad poblacional publicada por la Secretaría Distrital de Planeación y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

El modelo propuesto puede aplicarse en otras ciudades de Colombia o incluso en otras ciudades de América Latina, ya que tiene la flexibilidad de trabajar con diferentes datos bajo las mismas restricciones, lo único que se requiere son los datos particulares de la región a estudiar.

Se sugiere que para ejecutar este modelo debe hacerse bajo la estrategia de maximizar la cobertura de atención a pacientes con diagnóstico de obesidad infantil y al mismo tiempo minimizar los costos para la habilitación de Centros de Detección y Prevención. Al proporcionar atención médica especializada a pacientes con diagnóstico de obesidad podría reducir los casos en Colombia en los próximos años.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Daskin, *Network and discrete location: models, algorithms and applications*. John Wiley & Sons, 1995.
- [2] A. Ahmadi-Javid, P. Seyedi, and S. S. Syam, "A survey of healthcare facility location," *Comput. Oper. Res.*, vol. 79, pp. 223–263, 2017.
- [3] SISPRO, "SISPRO," 2021.
- [4] W. Zhang, K. Cao, S. Liu, and B. Huang, "A multi-objective optimization approach for health-care facility location-allocation problems in highly developed cities such as Hong Kong," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 59, pp. 220–230, 2016.

- [5] J. L. Temple, P. Cordero, J. Li, V. Nguyen, and J. A. Oben, *A guide to non-alcoholic fatty liver disease in childhood and adolescence*, vol. 17, no. 6. 2016.
- [6] N. H. Campos Rivera and T. I. Sotelo Quiñonez, "Diseño y validación de una escala de actitudes maternas hacia el sobrepeso y la obesidad infantil," *Acta Colomb. Psicol.*, vol. 22, no. 2, pp. 148–162, 2019.
- [7] L. Monasta *et al.*, "Early-life determinants of overweight and obesity: A review of systematic reviews," *Obes. Rev.*, vol. 11, no. 10, pp. 695–708, 2010.
- [8] R. I. De la Vega Morales and L. Cruz Hernández, "Efectos de la terapia cognitivo-conductual en factores asociados a la obesidad: un estudio de caso," *Psicol. y Salud*, vol. 28, no. 1, pp. 85–94, 2018.
- [9] R. Dalle Grave, M. Sartirana, and S. Calugi, "Personalized cognitive-behavioural therapy for obesity (CBT-OB): Theory, strategies and procedures," *Biopsychosoc. Med.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [10] Secretaría Distrital de Planeación, "Secretaría Distrital de Planeación," 2018. .
- [11] Ministerio de Salud y Protección Social, *Resolución Número 3280*. 2018.
- [12] Departamento Administrativo de la Función Pública, *Concepto 115871*. 2019

Modelo para los procesos logísticos de suministro y distribución de medicamentos oncológicos

Pablo César Franco Vásquez¹
Cristhian Stiven Valencia Serna²
Sebastián Rojas Leal³
Universidad Católica de Pereira
Colombia

Los procesos logísticos de distribución, almacenamiento, transporte, despacho, inventarios, manipulación y dispensación afectan directamente la realización de procedimientos médicos incidiendo en la expectativa o calidad de vida de los pacientes; más aún cuando se trata de medicamentos oncológicos, debido a la sensibilidad de los tratamientos ante la suspensión o cambio de un producto por ruptura de la cadena de suministro. Por ende, los sistemas de salud deben dar prioridad a las actividades logísticas que garanticen el abastecimiento, continuidad y calidad en los tratamientos farmacológicos. Es posible encontrar problemas de índole logístico que afectan la entrega de los medicamentos al paciente final, tales como manipulación inapropiada, imprecisión en las entregas, malas prácticas en el proceso de transporte y sistemas de almacenamiento inadecuados o no acondicionados de manera correcta. Factores como los mencionados no solo afectan el nivel de servicio de una cadena logística, sino que también aumenta la probabilidad de ruptura de la cadena y generando agotados, faltantes, mermas, prescripciones mal despachadas o dispensadas, retrasos, pedidos incompletos, aumento en la obsolescencia y deterioro de medicamentos en inventario. Otro factor relevante es el alto valor de los medicamentos oncológicos y el costo representativo de su manipulación, transporte y tenencia, que, de no hacerse de manera correcta, pueden representar pérdidas significativas para las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud IPS. Esta investigación busca generar un modelo que disminuya la probabilidad de ruptura en la cadena logística apoyado en la gestión de indicadores, de manera tal que les permita a los actores que la conforman controlar y prevenir sus causas, logrando que el sistema reaccione y se establezca evitando el desabastecimiento. La construcción del modelo se basa en la representación estructurada de los procesos logísticos y de los actores que integran la cadena de suministro y distribución de medicamentos oncológicos en la ciudad de Pereira, Colombia.

¹ Ingeniero Industrial, Especialista en logística Integral, Especialista en Pedagogía y Desarrollo Humano y Magister(c) en Investigación Operativa y Estadística.

Contacto: pablo.franco@ucp.edu.co

² Técnico en Instalaciones Eléctricas Domiciliarias, Tecnólogo en Diseño de Elementos Mecánicos para su Fabricación con Máquinas y Herramientas CNC, Ingeniero Industrial, Joven Investigador.

Contacto: cristhian1.valencia@ucp.edu.co

³ Ingeniero Industrial, Joven Investigador.

Contacto: sebastian.rojas@ucp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La cadena logística (para el proyecto el concepto de cadena logística involucra las acciones de suministro y distribución desde la perspectiva logística) se ha convertido en los últimos años en un elemento de gran importancia para todas las compañías sin importar el sector o renglón de la economía al que pertenezcan, la complejidad o tamaño no las exonera de su influencia; inclusive compañías pequeñas tienen múltiples proveedores, cientos de líneas de productos y miles de posiciones de inventario y almacenamiento, para luego cerrar el ciclo llevando esos productos o servicios a infinidad de destinos con igual o más número de clientes.

La cadena de abastecimiento a la que se orienta el proyecto de investigación es la conformada por los eslabones que se conectan para permitir el flujo de medicamentos hasta las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud IPS, específicamente los medicamentos oncológicos que implican unas condiciones técnicas, normativas y legales de manipulación y transporte especiales, lo que hace relevante el interés y la complejidad de esta cadena. El tema central de la ponencia se relaciona con el proceso de construcción de un *modelo de interacción entre los actores de la cadena logística de medicamentos oncológicos* que permita esquematizar los flujos de comunicación y establecer los indicadores estructurales que garanticen en gran medida un buen funcionamiento.

La investigación pretende mejorar los niveles de desempeño de la cadena de suministro y de los canales de distribución, estableciendo un modelo que brinde a las IPS, operadores logísticos o gestores farmacéuticos mejores resultados en el flujo de los medicamentos a través de la disminución de agotados, faltantes, obsolescencia, medicamentos deteriorados o con averías, mermas, prescripciones mal despachadas o dispensadas, retrasos y pedidos incompletos o inexactos.

El tema escogido, la población y producto presentan características que de antemano suponen dificultades como el acceso a la información, la complejidad de la red de distribución y el hermetismo de los eslabones que la componen. Este escenario supone un reto complejo que vale la pena afrontar si se tiene en cuenta que el modelo que se construya tendrá un impacto positivo en la calidad o expectativa de vida de los pacientes que padecen patologías oncológicas y afectará de manera positiva el nivel de servicio de las IPS desde la perspectiva de garantizar el suministro de medicamentos. Un valor agregado del proyecto de investigación es la posible extrapolación del modelo a otro tipo de medicamentos.

El rol que posee cada integrante está definido por su papel en la cadena, se pueden encontrar fabricantes (grandes generadores) y distribuidores mayoristas y minoristas (grandes comerciantes), operadores logísticos o gestores farmacéuticos, Entidades Promotoras de Salud EPS e IPS, clientes finales o usuarios (régimen contributivo, régimen subsidiado), régimen especial de salud, asociaciones de usuarios/pacientes y entidades gubernamentales. Lo mencionado anteriormente conforma las capas del modelo, que a su vez representan los actores de la cadena; para facilitar el entendimiento del modelo, se abordará a continuación de manera breve cada uno de ellos.

El Estado cumple el rol como agente regulador, brindando no sólo el marco legal e institucional adecuado sino también los mecanismos de gestión y control necesarios para el funcionamiento del mismo. A su vez, debe garantizar la provisión de información a los distintos actores que intervienen en el sector. En particular, debe disminuir el desbalance y desequilibrio que hay entre los oferentes y el mercado, a fin de proteger y velar por la defensa de los derechos de los ciudadanos, en su calidad de pacientes y consumidores.

Después de la implementación de la Ley 100 de 1993, el mercado institucional de la salud se ha transformando en Colombia regulando todo lo referente a las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud y Entidades Promotoras de Salud. La clasificación de prestadores por niveles de complejidad nace con la Ley 10 del 10 de enero de 1990, posteriormente, el Decreto 1760 del 2 de agosto de 1990, reglamentó la mencionada ley, fijó los criterios para definir el grado de complejidad, posteriormente, con la Resolución 1043 y el Decreto 1011 del 3 de abril de 2006, se establecieron las condiciones que deben cumplir los prestadores públicos y privados para habilitar sus servicios.

Hoy en día el Ministerio de Salud y Protección Social es el responsable de regular el sector institucional. Mediante la resolución 1604 de 2013 el Ministerio establece que todas las empresas Administradoras de Planes de Beneficios y las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud de todos los regímenes deben entregar los medicamentos a los que tiene derecho el afiliado en no más de 48 horas, estas disposiciones deben ser acatadas y cumplidas por las Empresas Administradoras de Planes de Beneficios y su red de prestación de servicios, e inclusive todas las instituciones del Sistema General de Seguridad Social en Salud pertenecientes a los regímenes exceptuados. Esto ha generado que el mercado institucional se transforme para ganar un mayor espacio en la cadena de distribución de los medicamentos a los consumidores, especialmente bajo la figura de las EPS. Quienes han aumentado su participación en la distribución a los consumidores llegando a tener un 15% del total [1].

La ley 1966 del 2019, artículo 2 parágrafo 1 dice que se entiende por gestores farmacéuticos a los operadores logísticos, cadenas de droguerías, cajas de compensación o establecimientos de comercio, entre otros, cuando realicen la dispensación ambulatoria en establecimientos farmacéuticos a los afiliados del Sistema General de Seguridad Social en Salud por encargo contractual de las EPS, IPS y de otros actores del sistema. Ahora bien, desde un marco conceptual de logística, un operador logístico *es la empresa que lleva a cabo la planificación, la implantación y el control de manera eficiente del flujo físico a través de la cadena de suministro, así como todos los servicios e información asociados al mismo, desde el punto de origen hasta el punto de consumo, con el objeto de satisfacer los requerimientos del cliente* [2].

Las funciones de estos actores han aumentado en 300% en el nivel entrega para 2020, teniendo cobertura a una mayor población en riesgo, garantizando que los medicamentos no lleguen falsificados o dañados a los pacientes.

Sector comercial compuesto principalmente por mayoristas y minoristas, para el caso de los mayoristas se encuentran representado por grandes comerciantes especializados como por ejemplo Dromayor, Cruz Verde, Pharmecenter, Coservir, Unidrogas entre otros, y los minoristas conformados por farmacias tanto de cadenas como independientes, además de las que hacen parte de supermercados u otros almacenes de grandes superficies, entre otras. Estas se abastecen de los distribuidores, y ocasionalmente las grandes cadenas de farmacias directamente de los laboratorios.

Los fabricantes, productores o grandes generadores son los responsables de la producción de todos los medicamentos a nivel global, están representados por las firmas farmacéuticas más importantes del mundo, para el caso de la investigación solo se tiene en cuenta como un punto de referencia en el modelo debido a la delimitación geográfica del estudio porque en la zona de influencia no existen fabricantes de medicamentos oncológicos.

Ahora bien, los actores descritos aparecen en una secuencia lógica en el modelo de tal manera que le da sentido al flujo de los medicamentos en el proceso de suministro y distribución, pero surge una cuestión, ¿cómo hacer para que el modelo además de establecer la secuencia, la operacionalice para que los flujos no se detengan o sufran rupturas?, la respuesta que se propone es identificar las actividades logísticas fundamentales entre cada eslabón, y a cada una de ellas establecerle un conjunto de indicadores que permitan controlar y evaluar su desempeño, pero más allá de que funcionen de manera independiente se busca establecer la interacción integral y sistemática de todos estos indicadores.

Hay una gran variedad de indicadores de todo tipo y aplicación, de esta amplia gama se seleccionan para el proyecto aquellos que son útiles para apoyar el proceso de control, seguimiento y evaluación de cada etapa del sistema de suministro y distribución de medicamentos. Los indicadores que se presentan a continuación están discriminados según el área logística con la que se relacionen:

- *Gestión de compras:* Variación en la demanda, nivel de cumplimientos proveedores, lead time, calidad de pedidos generados y entregas perfectamente recibidas, los cuales miden y evalúan los proveedores que participan en el proceso de abastecimiento y nivel de reaprovisionamiento.
- *Inventario:* Exactitud de los inventarios, registro de devoluciones, rotación de inventarios, vejez y ajuste de los inventarios.

- *Dispensación/Despacho*: Nivel de cumplimiento de despacho o dispensación, error de llenado de carro de unidosis o flota de transporte, deterioros en dispensación y exactitud de *picking*.
- *Almacenamiento*: Número de averías por mala manipulación en almacenamiento, capacidad del almacén, registro de almacenados, eficiencia del sistema de almacenamiento (WMS y L.A.S.A), Conservación de medicamentos en almacenamiento
- *Transporte*: Entregas perfectas y a tiempo, medicamentos deteriorados durante el transporte, entregas parciales y nivel de utilización en medios de transporte.

El modelo integra las actividades de gestión de compras, inventarios, almacenamiento, despacho o dispensación y transporte por medio de los indicadores mencionados anteriormente para conocer el desempeño en tiempo real y oportuno para así definir procesos de mejora y toma de decisiones a tiempo para evitar que se presente la ruptura en la cadena.

2. MARCO CONCEPTUAL

El proyecto de investigación tiene su sustento teórico en las bases fundamentales de la logística, la gestión de la cadena de suministro y en los procesos de distribución, empero, debido al perfil del tema específico que se relaciona con el flujo de medicamentos oncológicos a través de dicha cadena; el enfoque con el que se aborda tiene matices desde el área de calidad.

La logística pertenece al proceso de la cadena de suministro que planea, lleva a cabo y controla el flujo de los almacenamientos eficientes y efectivos de los bienes y servicios, del mismo modo, la información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo, con el fin de satisfacer los requerimientos de los clientes [3].

La gestión de la calidad de la cadena de suministro SCQM es la coordinación e integración formal de procesos comerciales que involucran a todas las organizaciones asociadas en el canal de suministro para medir, analizar y mejorar continuamente productos, servicios y procesos con el fin de crear valor y lograr la satisfacción de los clientes intermedios y finales en el mercado [4].

La cadena de suministro son un conjunto de procesos como el compras, almacenamiento, inventario, despacho y transporte; que se repiten varias veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales las materias primas se convierten en productos terminados y se agrega valor al consumidor [5]. La gestión de la cadena de suministro plantea mejorar las empresas mediante la eliminación del desperdicio y un uso más eficiente de las capacidades internas y externas y la tecnología, creando una perfecta cadena de suministro [6].

El departamento de compras se considera por muchos el primero eslabón de la cadena de abastecimiento, por tal razón, es el punto de partida para el abastecimiento de la empresa, garantizando el abasto de manera oportuna y en sus mejores condiciones. El área de compras debe tener una visión integral de la cadena de suministro por lo que debe responder preguntas como ¿cuánto material se debe solicitar? ¿Con qué frecuencia de reposición se debe pedir los insumos? ¿Cuál es el programa de entrega óptimo por parte del proveedor? ¿Cuál es el nivel de inventario óptimo que se debe mantener, tanto en las instalaciones del proveedor como los almacenes propios, según parámetros internos (por ejemplo, segmentación de materiales, restricciones de capacidad de almacenamiento, frecuencia de reposición requerida, etcétera) y externos (lotes mínimos, tiempos de entrega, comportamiento de la demanda, entre otros)? [7].

El almacenamiento es un proceso crítico que inciden en la conservación de los medicamentos a lo largo de su cadena de abastecimiento hasta el paciente, de igual manera, se encarga de controlar los procesos de requerimiento, recepción, distribución y control de existencias, con el fin de garantizar una buena calidad en la fabricación. El impacto de un correcto almacenamiento se refleja directamente en la calidad el medicamento que se produce, por lo cual, sino se tiene un correcto almacenamiento de la materia prima del tiempo de vida útil del producto no será el que indica el envase, ocasionado gastos adicionales e injustificados por el paciente [8].

Los inventarios son los encargados de registrar y controlar las cantidades almacenadas de los materiales para facilitar la producción y distribución con el objetivo de satisfacer la demanda. El sistema de gestión de inventarios se encarga del buen uso del manejo en los niveles de rotación que estos presenten, con el fin tener una protección contra la incertidumbre, por lo que se debe conservar inventarios de seguridad para responder a los cambios inesperados de la demanda [9].

El despacho es el proceso que proveen bienes y servicios terminados a los clientes con el fin de satisfacer una necesidad. El despacho en farmacia o desde la IPS es el establecimiento sanitario donde se realiza la entrega de la medicación ya sea prescrita por el paciente o de compra particular y se hace entrega de la información necesaria para su uso [10]. Según Lisa Terry [11], los proveedores de medicamentos suelen trabajar con empresas gestores farmacéuticos u operadores logísticos, es decir, tercerizando el proceso de despacho, buscando infraestructura segura y capacidades tecnológicas que ayuden asegurar los estándares mínimos requeridos como un adecuado empaque y embalaje, mantener los algunos medicamentos a menos de 25 grados Celsius, incluso requieren de un transporte en frío en intervalos entre 1,5 y 7 grados y verificación externa de las condiciones físicas de la mercancía.

El transporte es una de las actividades económicas más importantes para una empresa ya que permite trasladar material de un lugar a otro. Los productos farmacéuticos transportados deben disponer de la infraestructura y equipos necesarios para asegurar la calidad de los medicamentos y cumplir unas condiciones mínimas como total limpieza del vehículo de transporte donde se van almacenar para preservar la integridad de los fármacos, los productos deben ser entregados en los tiempos estimados y los que necesiten cadena de frío deberán contar con los equipos de control climático para asegurar la temperatura y humedad requerida por el medicamento [12].

Los indicadores son necesarios para una mejora continua, *Lo que no se mide no se puede controlar, y lo que no se controla no se puede gestionar* [13]. Los indicadores permiten evaluar el desempeño y resultado de cada proceso de la cadena logística, lo cual, tienen como objetivo identificar y tomar acción sobre fallas operativas, aumentar la expectativa de cliente al reducir el tiempo de entrega y mejorar el uso de los recursos para el aumento de la productividad y efectividad en las diferentes actividades hacia el consumidor final. Además, la utilidad de los indicadores ayuda a identificar mejorar internas, parametrizar la planeación de la actividad logística y realizar la medición de resultados [14].

Los gestores farmacéuticos u operadores logísticos son los encargados de diseñar, gestionar y controlar los procesos de la cadena de suministro y abastecimiento de otras empresas [15]. De acuerdo a sus funciones establecidas con la entidad, puede estar en la fase de aprovisionamiento, transporte, almacenaje o de distribución, en el caso del manejo de medicamentos en IPS donde su participación es cada vez más fuerte, ellos se encuentran operando en el área de suministro, despacho y transporte [16].

3. MÉTODO

El proyecto de investigación se define en 4 fases cronológicas, la primera fase consiste en el desarrollo del instrumento de recolección de datos, que permita conocer el estado actual de los procesos logísticos de los medicamentos oncológicos en las IPS de la ciudad de Pereira, posteriormente al desarrollo del instrumento, se plantea su validación con profesionales expertos en logística y cadenas de suministro, para luego aplicarse en los eslabones de la cadena que hacen parte del estudio como lo son los operadores logísticos o gestores farmacéuticos y las IPS.

La segunda fase consta de la sistematización y análisis de datos para la conceptualización del estado actual de la cadena logística de los medicamentos oncológicos en la ciudad de Pereira, definir las fases que competen al proceso de suministro y distribución e identificar los indicadores, más específicamente los Key performance Indicators KPI o indicadores claves de rendimiento o desempeño en español, que permitan hacer seguimiento y control de manera sistemática a todas las actividades dentro de la cadena para así tomar medidas de acción que impidan o disminuyan la probabilidad de ruptura o faltantes, para ello la evaluación de las tareas que se dan dentro del proceso logístico es primordial. Esta fase aporta los

elementos fundamentales para la construcción del documento línea base del proyecto con la participación de diferentes actores de la cadena.

La tercera fase consiste en desarrollar una batería de indicadores basados en los KPI que será evaluada con los mismos actores, para validar su percepción. Estas fases se estructuran como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Fases de la Investigación

3.1 Metodología

Según Hernández et al. [17], la investigación exploratoria no intenta dar explicación respecto del problema, sino sólo recoger e identificar antecedentes generales, números y cuantificaciones, temas y tópicos respecto del problema investigado, sugerencias de aspectos relacionados que deberían examinarse en profundidad en futuras investigaciones. Su objetivo es documentar ciertas experiencias, examinar temas o problemas poco estudiados o que no han sido abordadas antes, por lo tanto el enfoque de la presente investigación es de carácter exploratorio debido a que el desarrollo se basa en describir el problema general, como lo son las inconsistencias e irregularidades que se puedan presentar en los tratamientos de oncología, por faltantes, agotados o mermas de los medicamentos, debido a la ruptura de la cadena de suministro; para resolver el problema seleccionado se abordan las diferentes fases logísticas del proceso de la cadena y en cada una se realiza la indagación correspondiente además de realizar de forma paralela la revisión del estado del arte con base en revisión de literatura, estudio de casos y análisis de investigaciones previas en temas relacionados o afines.

Sin embargo, la investigación que una primera fase se asume exploratoria más adelante puede desarrollar características descriptivas, pues se puede buscar, especificar las propiedades y características, tanto de las personas como grupos o comunidades que sean sometidas al análisis. Según Van Dalen y Meyer [18] la investigación descriptiva consiste en: llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos y personas. Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables. La investigación en curso busca establecer conductas sistemáticas a seguir, con base en la construcción de un modelo de indicadores KPI que permitan prevenir la ruptura de la cadena logística, por lo tanto, también tiene un corte de investigación descriptiva.

Este proyecto de investigación, para su etapa de desarrollo teórico cuenta además con un enfoque deductivo, que parte de conceptos generales los cuales se van desglosando para llegar a lo particular, con el fin de dar una explicación más detallada de los elementos que la conforman. Al mismo tiempo se puede argumentar, que por las características del estudio la investigación es de tipo tanto cuantitativo como cualitativo, ya que se cuenta con bibliografía especializada, entrevistas, aplicación del instrumento especializado para recolección de la información, observación directa y seguimiento de casos.

Por medio de la recolección de datos, se busca contrastar los resultados obtenidos en las entrevistas con el diseño de la herramienta creada para medir el objetivo. La observación directa y las entrevistas suministradas a los diferentes encargados de la operación logística en las IPS permitirán determinar la forma como se están llevando a cabo los procesos de logísticos en las instituciones seleccionadas para el estudio.

3.2 Población y muestra

La población objetivo de la investigación son las IPS especializadas en tratamientos contra el cáncer de la ciudad de Pereira del departamento de Risaralda, Colombia; la muestra será por conveniencia, dado que se

procede a realizar un censo, pero al ser información tan privada y de difícil acceso, será convenidos a las que están dispuestas a colaborar con los datos necesarios para el desarrollo del trabajo. Además de eso también pueden intervenir otros actores, como pueden ser operadores logísticos y centrales de mezclas. A continuación, se expone todos los apartados de la metodología en Figura 2.

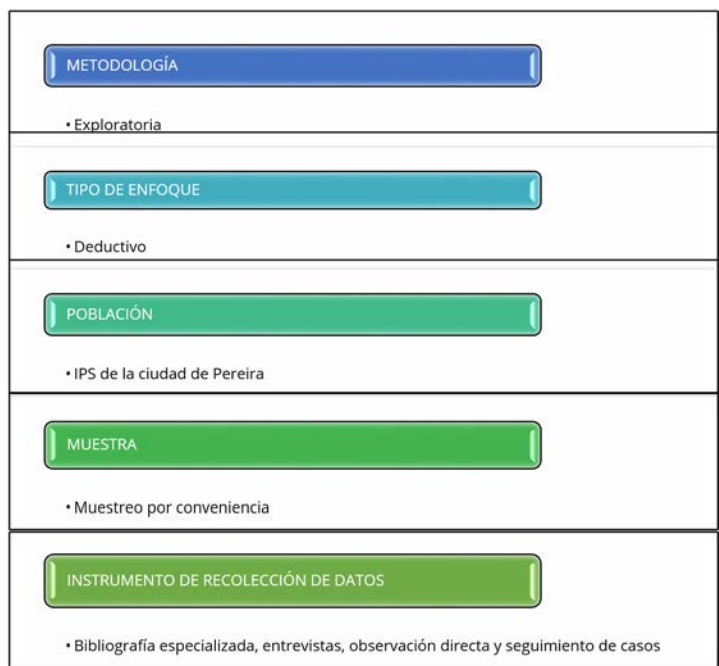


Figura 2. Resumen de la metodología de investigación

4. RESULTADOS

La efectividad de la cadena logística de medicamentos oncológicos puede evaluarse desde muchos factores, sin embargo, todos redundan en la entrega de productos o servicios correctos en el lugar adecuado, en el tiempo oportuno, en la condición estipulada y en las cantidades pactadas, así mismo estos factores se deben evaluar constantemente en cualquier parte del flujo. De no cumplirse lo anterior las consecuencias pueden ocasionar la ruptura de la cadena o incidirá de manera directa y negativa en el nivel de servicio y en los costos de operación, por ejemplo, demoras en las entregas, entregas imprecisas, falta de visibilidad en el proceso que se evidencia en la no trazabilidad, monitoreo o dificultad en la obtención de información relevante en tiempo oportuno o tiempo real, sobre-stocks o agotamiento de inventarios, faltantes recurrentes por obsolescencia y deterioro, pedidos incompletos o inexactos. Cualquier elemento de los anteriormente mencionados que se presente en una cadena logística, puede ser causa o síntoma que evidencia que la cadena presenta problemas en el desempeño de suministro de medicamentos a los pacientes.

Una imagen que resume de manera gráfica las decisiones claves en la gestión de suministros de medicamentos y en sus procesos de distribución es la que se encuentra en la Figura 3.

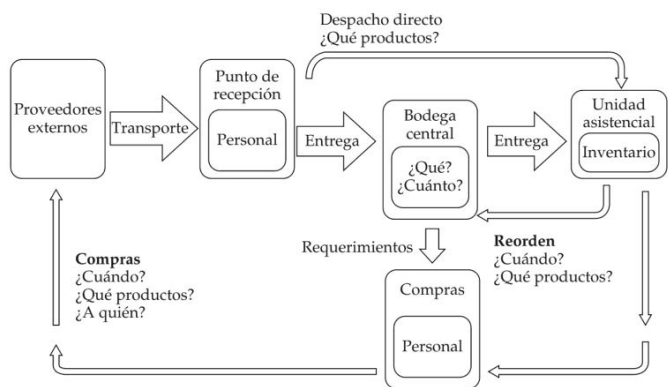


Figura 3. Decisiones Clave en la Gestión de Suministro [19]

Para el caso de la cadena logística de medicamentos oncológicos, uno de los indicadores más importantes es el de la medición de agotados. Las cadenas de suministro especializadas en medicamentos revisten características particulares que las diferencian de otras cadenas de suministro, de manera tal que su configuración es mucho más compleja y exigente, esto se puede explicar debido a la importancia en el cumplimiento en las entregas de los medicamentos a los pacientes y su relación con la calidad de vida o expectativa de vida de los mismos.

Existen medicamentos de control especial o de circulación *regulada* que generan custodias o controles especiales, de la misma forma, medicamentos no registrados en la base sanitaria de Colombia pero avalados por otra entidad de vigilancia exterior Unirs (medicamentos con usos no incluidos en el registro sanitario) que cuentan con una categoría especial para la adquisición, importación o exportación, a través de la Ventanilla Única de Comercio exterior VUCE, que permite el trámite electrónico de autorizaciones, permisos, certificaciones o vistos buenos, exigidas por las entidades del Estado, lo que hace que el proceso de distribución sea más complejo.

Además, se debe recordar que los medicamentos son productos perecederos, esto hace que las fechas de vencimiento, las normas de manipulación y almacenamiento incrementen la presión en el sistema.

4.1 Fallas en el desempeño de la cadena logística de medicamentos oncológicos

Para el caso de Pereira la cadena logística de medicamentos inicia con los procesos de compra a los grandes productores farmacéuticos en el mundo a través de organizaciones especializadas como por ejemplo grandes operadores logísticos, gestores farmacéuticos, grandes comerciantes y entidades gubernamentales, debido a que no hay laboratorios que fabriquen medicamentos oncológicos en la ciudad.

En el mundo los productores de las materias primas como principios activos, subproductos de las cadenas agroindustriales que aportan insumos y cadenas industriales que contribuyen en la cadena principalmente con los materiales para el empaque y embalaje de los medicamentos se han ubicado en los últimos años principalmente en China e India.

Los principales laboratorios farmacéuticos tienen sus plantas matrices productoras de las principales moléculas también en estos países, este eslabón es el primero de la cadena y por lo tanto su impacto es global; para el modelo generado por el proyecto de investigación este eslabón se encuentra en el centro del modelo.

El Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia delegó las labores de elaboración de informes, certificados, funciones de Control Interno, de planeación, de licencias y registros de medicamentos de alimentos y de insumos, con sus respectivas divisiones y laboratorios a la entidad de vigilancia INVIMA, la cual después del año 2018 registra también en sus bases de datos medicamentos desabastecidos.

En la Tabla 1 se muestra los fármacos oncológicos en condición de agotados registrada en el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos INVIMA. Las causas de desabastecimiento y los estados relacionados a esas causas se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 1. Medicamentos oncológicos desabastecidos

5-fluoracilo	24%
Metrotexato	22%
Calcio folinato	22%
Cisplatino	12%
Letrozol	8%
Doxorrubicina	4%
Forma farmacéutica afectada inyectable	82%
Orales	8%
Marca	59%
Genéricos	41%

Tabla 2. Causas de Desabastecimiento

Causas de desabastecimiento	Descripción
Aumento de la demanda	Demanda supera la producción habitual
Descontinuación del producto	Decisión de titulares de registro sanitario de no continuar con comercialización del medicamento
Insuficientes oferentes	Número insuficiente de titulares de registro comercializando el medicamento
Modificaciones de RS pendientes	Modificaciones al RS que afectan la producción pendientes o en curso (p.ej cambio de empaque secundario, cambio de acondicionador)
No aplica	Caso en estudio
Problemas de manufactura	Fabricantes han presentado inconvenientes en la producción del medicamento por no certificación vigente de Buenas Prácticas de Manufactura BPM.
Problemas en la adquisición de materia prima	Fabricantes con dificultades de adquisición de materia prima por desabastecimiento, fallos en calidad, incumplimiento de requisitos de importación, etc.
Estado	Definición
Cerrado	Solucionado o descartado
En estudio	En curso la búsqueda, consolidación, análisis y verificación de datos para determinar estado de abastecimiento
Desabastecido	Se confirma que la disponibilidad del medicamento es insuficiente con respecto a la demanda
En monitorización	En observación y seguimiento de la disponibilidad.

Se resalta la importancia que tiene evitar la ruptura de la cadena Logística de medicamentos oncológicos, por el impacto que esto puede llegar a tener en los tratamientos de los pacientes, por lo tanto, es adecuado preguntarse. ¿Qué pasa con los tratamientos, la calidad de vida y la expectativa de vida de los pacientes que dependen de estos medicamentos? Al suspenderse el suministro, el sistema de salud debe buscar de manera inmediata los posibles sustitutos o dependiendo del caso buscar alternativas para garantizar el reaprovisionamiento lo antes posible.

Las principales causas de ruptura o de no conformidades en la cadena de suministro desde los operadores hacia las IPS son en mayor medida de corte logístico, aunque como es lógico, sí el laboratorio presenta agotados, por ende, el operador logístico también los presentará. Los operadores logísticos se abastecen de Multinacionales: GlaxoSmithKline (12%), Pfizer (8%), Bayer (8%). Nacionales: Tecnoquímicas (7%), Genfar (7%), Lafranco (7%). En cuanto a la producción de medicamentos en Colombia, existen 40 organizaciones entre laboratorios y maquiladores que se encargan de la producción nacional, los más representativos están ubicados en Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín, aunque tienen presencia en todo el país por medio de sus distribuidores.

Por último, las IPS también presentan problemas en su flujo logístico debido a que es posible que, al momento de hacer la dispensación, manipular los medicamentos, realizar el control de inventarios y gestionar los procesos de almacenamiento, estas actividades no se hagan de manera correcta ocasionando inconvenientes como el aumento de los tiempos de operación y administración de los medicamentos, impactando la continuidad de los tratamientos aplicados a los pacientes.

La preparación de estos medicamentos es realizada por las centrales de mezcla CM, quienes se encargan de realizar labores de apoyo administrativo, técnico y operativo, en el cual se acondicionan y adecuan medicamentos oncológicos, medicamentos estériles nutriciones parenterales y re-empaque de medicamentos sólidos y orales, abasteciendo directamente a las IPS. De presentarse un problema ya sea en adecuación o preparación de dosis, en el empaque o envase de los medicamentos, provocarán retrasos que afectan directamente a las IPS al momento suministrar o aplicar los tratamientos.

Un medicamento con avería es aquel fármaco cuya condición física o química se ha visto afectada tanto en el producto como en su presentación, ocasionando un estado de deterioro y revisión de su contenido o empaque para ser retirado o reciclado.

La estabilidad de un medicamento de índole oncológico, se define en conservar sus características tanto de presentación como en su contenido, evitar alteraciones de luz o temperatura, a base de monitoreos o mantenimientos de los medios de transporte y almacenamiento, garantizan su integridad en toda la cadena logística.

Los medicamentos se consideran vencidos cuando han llegado o superado a la fecha indicada por el fabricante en la cual el medicamento llega al fin de su vida útil. En el caso de los oncológicos después de salir de la central de mezclas, las indicaciones de uso y tiempo de administración pasan a darlas esta última. Al encontrar daños en fármacos o deterioros, estos pasan a un proceso controlado de eliminación y a un lugar donde no comprometa la integridad y presentación de los otros medicamentos.

En la Figura 4 se sintetiza el proceso de identificación y devolución de medicamentos a lo largo de la cadena de suministros debido a las no conformidades halladas en los productos farmacéuticos relacionadas con fechas de vencimiento o averías en forma general tanto para medicamentos de control especial o no. Este diagrama es resultado del proyecto de investigación y hace parte del modelo diseñado.

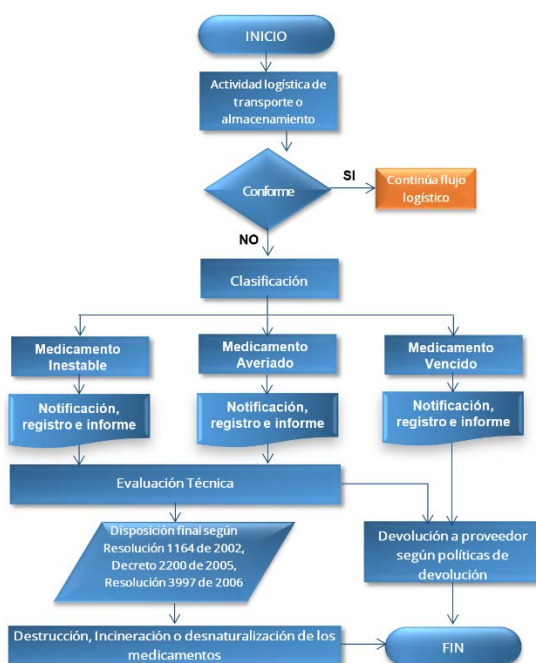


Figura 4. Proceso de Identificación y Devolución de Medicamentos

La mayoría de las fallas en operaciones o actividades que conforman la cadena logística de medicamentos oncológicos en la ciudad de Pereira, se relacionan con errores de despacho, devoluciones, pedidos incompletos, entregas a destiempo, devoluciones parciales, productos faltantes y productos averiados. Por ende, algunos indicadores generales como rotación de inventarios, capacidad utilizada de los sistemas de almacenamiento y lead time, son necesarios para evaluar y controlar los procesos. Para obtener la mayor cantidad de datos que represente el flujo de medicamentos de Pereira, se muestra en la Tabla 3 los fármacos oncológicos más representativos y con mayor flujo de la ciudad de Pereira.

Tabla 3. Medicamentos Oncológicos más Representativos en Pereira

Número	Nombre	Descripción
1	Fluorouracilo	5-Fluorouracilo solución inyectable 500 mg/10 ml
2	Teronred	Abiraterona acetato tableta 250 mg
3	Trozolet	Anastrozol tableta 1 mg
4	Tecentriq	Atezolizumab solución inyectable 1200 mg/20 ml
5	Bavencio	Avelumab solución concentrada para infusión 20 mg/ml/10 ml
.....		
58	Gemcitabina	Gemcitabina solución inyectable 1 g/100 ml
59	Gemcimira	Gemcitabina solución inyectable 1 g/26.3 ml
60	Hydroxyurea	Hidroxiurea capsula 500 mg
61	Zavedos	Idarubicina solución inyectable 10 mg/10 ml
62	Uromida	Ifosfamida polvo para reconstituir a sol. iny. 1 g
.....		
117	Venclexta	Venetoclax tableta recubierta 100 mg
118	Venclexta	Venetoclax tableta recubierta 50 mg
119	Vincablas	Vinblastina sulfato polvo para reconstituir a sol. iny. 10 mg
120	Vincristina	Vincristina polvo para reconstituir a sol. iny. 1 mg
121	Vinorelbine	Vinorelbina (10mg/ml) solución inyectable 50 mg/5 ml

Para el caso de Pereira los operadores logísticos o gestores farmacéuticos entregan mensualmente un promedio de 4,790 formulas al mes de las cuales el 43.5% se hacen a través del servicio ambulatorio y el 56.5% restante se entregan por el servicio hospitalario. Durante el proceso de despacho de estas fórmulas se encuentran no conformidades que redundan en la mala prestación del servicio, personas que hacen largas filas y cuando llega su turno son informados que la formula no se la pueden dispensar completa porque no hay existencias de todos los medicamentos recetados.

Otro error que se encontró fue el del despacho de medicamentos trocados o cambiados en muchas ocasiones por ser medicamentos Look Alike, Sound Alike LASA, aunque su incidencia en los ítems despachados en las IPS es baja. Del total de pedidos que se realizan en la cadena de suministros de medicamentos oncológicos en Pereira alrededor de 470 se entregan incompletos en un trimestre, lo que equivale aproximadamente a 157 pedidos mensuales.

Las entregas a tiempo representan el cumplimiento con el que los proveedores reabastecen a sus clientes en el flujo logístico y cotidiano de la cadena, son un factor clave en la evaluación de proveedores y generan confianza en el suministro. Este indicador es otro factor clave para medir la calidad de las operaciones logísticas. En las Figura 5 y 6 se observa un ejemplo de medicamentos averiados durante el almacenamiento y la manipulación en el transporte, y en la Figura 7 se encuentran cajas averiadas después del transporte.



Figuras 5 y 6. Productos averiados durante el almacenamiento y la manipulación



Figura 7. Productos averiados durante transporte (https://es.123rf.com/profile_nanypw>nanypw)

Productos trocados o cambiados son aquellos que por equivocación se despachan de manera incorrecta reemplazando al producto que realmente se estaba solicitando, las razones de que esto suceda son muy variadas desde simples distracciones, falta de capacitación, mala etiquetación de los productos o errores en la lectura de las mismas. Un elemento que facilita la ocurrencia de esta no conformidad son los medicamentos LASA, que debido al ser visualmente muy similares o por tener nombres que suenen muy parecidos generan probabilidades de confusión como se muestra en las Figuras 8 y 9.



Figuras 8 y 9. Productos oncológicos LASA (www.cphi-online.com/paclitaxel-aqvida-6-mg-ml-concentrate-for-prod960805.html?hcb=1)

Todos los factores ya mencionado presentan un problema en la cadena logística, rompen el sistema y afecta a todos los actores del proceso de suministro y distribución de medicamentos oncológicos, reprocesos de abastecimiento, de transporte, no solo alarga los plazos de tiempo para la aplicación oportuna de tratamientos contra el cáncer poniendo en peligro la integridad del último eslabón de la cadena (paciente final), si no que no dar una solución de raíz a los problemas, pueden recurrir en estos mismos y deteriorar toda la cadena. Por esto es necesario modelar la cadena para definir los actores y comenzar a definir las actividades, evaluarlas y aplicar indicadores de gestión que controlen el sistema. En la Figura 8 se presenta gráficamente la interacción de los medicamentos oncológicos en Colombia.

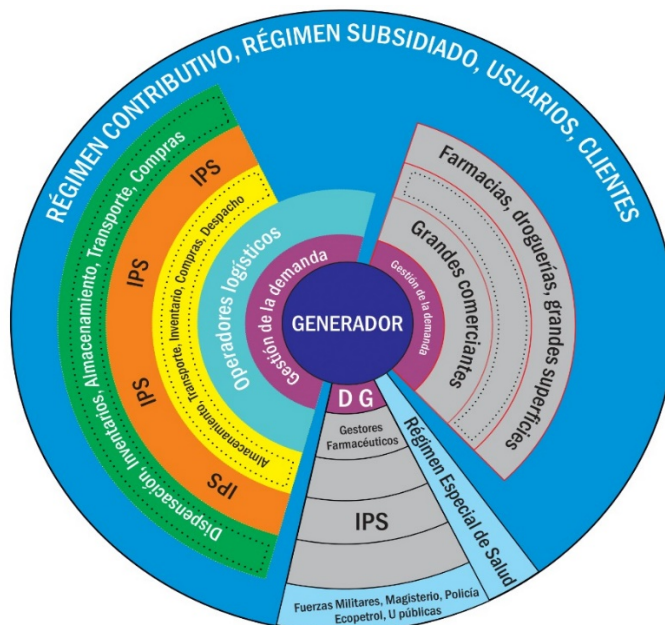


Figura 6. Modelo de interacción entre los actores de la cadena logística de medicamentos oncológicos

4.2 Modelo logístico

Las industrias farmacéuticas han tenido a través del tiempo un enorme avance en el campo científico y tecnológico. Estos avances han generado un gran crecimiento en el descubrimiento y desarrollo productos farmacéuticos innovadores ayudando a que actúen mejor en el proceso terapéutico y provocando menos efectos secundarios.

Según el informe las industrias farmacéuticas alcanzaron un valor de 1.11 mil millones de dólares durante 2018, con miras a registrar 1.43 mil millones de dólares para 2020. De ser así, la industria crecería en ese periodo 28.8%. Los expertos indican que la demanda de la rama oncológica, la neurociencia y el cuidado de la piel serían las tres áreas que darían mayor impulso en ese sentido [3].

Entre las compañías farmacéuticas más importantes que destacan por su nivel de ventas, participación en el mercado y crecimientos se pueden encontrar Roche, Bayer, Pfizer, Abbott, MERCK, SANOFI, NOVARTIS, Celgene, gsk y abbvie.

Los Operadores logísticos o gestores farmacéuticos son los encargados de la dispensación ambulatoria de medicamentos sea a las IPS o directamente al usuario. Él área de compras donde se encuentra en contacto directo con la IPS para el abastecimiento de medicamentos debe tener comunicación asertiva sobre lo que realmente se requiere. Es importante que cada institución cuenta con una política de compras para cumplir con las condiciones de calidad y entrega oportuna del mismo modo, realizar pronósticos con el fin de disminuir la incertidumbre al momento de la compra de lo contrario una mala planificación en la compra puede generar faltantes.

El transporte es una actividad logística fundamental para el logro del ciclo productivo de cualquier organización, representa un alto porcentaje de los costos totales de la operación y afecta la calidad de los

productos y los niveles de servicio de la cadena de suministro y de los canales de distribución. En el transporte las entregas no oportunas pueden retrasar los tratamientos de los pacientes al igual que las entregas incompletas. El transporte debe contar con las condiciones idóneas ya que algunos medicamentos son muy sensibles a la temperatura y debe estar en una cadena de frío porque en caso de romperse se perdería el producto.

Las áreas de almacenamiento deben tener la suficiente capacidad para permitir el almacenamiento de varias categorías de materiales y productos, con la adecuada separación y segregación: materias primas, material de empaque y envase, productos intermedios, a productos a granel y productos terminados, productos en cuarentena, productos liberados, rechazados y devueltos. En el almacenamiento los puntos de ruptura se pueden encontrar por confundir los medicamentos por su empaque, es decir, los lazos donde entregar un medicamento en lugar de otro genera la ruptura de la cadena hacia el paciente. La manipulación no adecuada puede generar un deterioro en el medicamento, alterando directamente el tratamiento. El gestor debe garantizar que el producto no esté falso o de contrabando, porque puede generar complicaciones en el paciente, y almacén debe verificar los productos al momento de recibirlos.

Un inventario permite tener un control exacto de los medicamentos en existencias destinados a ser despachados a las IPS, de igual manera, es importante tener la información clara y actualizada sobre la cantidad y la disponibilidad. Uno de los principales problemas es la falta de información comunicación lo que genera medicamento en sobre stock o faltantes. Es importante realizar un conteo físico periódico como una medida de control ya que puede haber medicamentos que queden en obsolescencia o se venzan lo cual genera pérdida para la empresa por la falta de rotación.

El proceso de despacho representa una actividad vital en la entrega del producto al cliente final, precisión de envío, constancia permanente en los envíos, documentación y disposición de los productos pueden ser gestionados a partir de esta actividad, en esta área prácticas presenta el mayor porcentaje de errores en los envíos y también la mayor cantidad de moras por proceso previos y generando muchos cuellos de botellas dentro de las organizaciones. Una mala verificación de las condiciones físicas del producto puede generar un deterioro en el producto durante su traslado lo cual generaría faltantes para tratamientos futuros, una información no precisa sobre la cantidad de producto a despachar hace que la trazabilidad sea más difícil generando retrasos en las entregas.

Las IPS quienes se encargan de prestar el servicio son el contacto directo con el paciente el cual es de suma importancia que la cadena fluya lo mejor posible.

Es importante que cada institución cuenta con una política de compras para cumplir con las condiciones de calidad y entrega oportuna del mismo modo, realizar pronósticos con el fin de disminuir la incertidumbre al momento de la compra de lo contrario una mala planificación en la compra puede generar faltantes. Es importante realizar evaluaciones a los proveedores con el fin de llevar una trazabilidad de los pedidos para no generar retrasos y donde se encuentran pedidos incompletos y un inadecuado pronóstico que no permite tener la cantidad de medicamentos necesarios. Es importante tener claro un lead time con los proveedores ya que se puede generar escases por no la entrega oportuna.

El transporte es una actividad logística fundamental para el logro del ciclo productivo de cualquier organización, representa un alto porcentaje de los costos totales de la operación y afecta la calidad de los productos y los niveles de servicio de la cadena de suministro y de los canales de distribución. En el transporte las entregas no oportunas pueden retrasar los tratamientos de los pacientes al igual que las entregas incompletas. El transporte debe contar con las condiciones idóneas ya que algunos medicamentos son muy sensibles a la temperatura y debe estar en una cadena de frío porque en caso de romperse se perdería el producto.

Las áreas de almacenamiento deben tener la suficiente capacidad para permitir el almacenamiento de varias categorías de materiales y productos, con la adecuada separación y segregación: materias primas, material de empaque y envase, productos intermedios, a productos a granel y productos terminados, productos en cuarentena, productos liberados, rechazados y devueltos. En el almacenamiento los puntos

de ruptura se pueden encontrar por confundir los medicamentos por su empaque, es decir, los lazos donde entregar un medicamento en lugar de otro genera la ruptura de la cadena hacia el paciente. La manipulación no adecuada puede generar un deterioro en el medicamento alterando directamente el tratamiento.

Un inventario permite tener un control exacto de los medicamentos en existencias destinados a ser despachados a las IPS, de igual manera, es importante tener la información clara y actualizada sobre la cantidad y la disponibilidad. Uno de los principales problemas es la falta de información comunicación lo que genera medicamento en sobre stock o faltantes. Es importante realizar un conteo físico periódico como una medida de control ya que puede haber medicamentos que queden en obsolescencia o se venzan lo cual genera pérdida para la empresa por la falta de rotación.

El proceso de dispensación representa una actividad vital en la entrega del producto al cliente final, precisión de envío, constancia permanente en los envíos, documentación y disposición de los productos pueden ser gestionados a partir de esta actividad, en esta área prácticas presenta el mayor porcentaje de errores en los envíos y también la mayor cantidad de moras por proceso previos y generando muchos cuellos de botellas dentro de las organizaciones. Una mala verificación de las condiciones físicas del producto puede generar un deterioro en el producto durante su traslado lo cual generaría faltantes para tratamientos futuros, una información no precisa sobre la cantidad de producto a despachar hace que la trazabilidad sea más difícil generando retrasos en las entregas.

Los usuarios en Colombia se divide en régimen contributivo y régimen subsidiario y son el consumidor final en la cadena logística donde deben disponer de un producto de óptimo y entregado a tiempo. Este tipo de usuario tienen contacto directamente con la IPS quienes le suministran el medicamento, pero también se pueden encontrar usuario o clientes particulares quienes acceden al medicamento por medio de farmacias, droguerías o grandes superficies.

Grandes comerciantes, farmacias, droguerías y grandes superficies son compañías donde se pueden acceder los usuarios particulares o en ocasiones donde las IPS pueden realizar compras urgentes para proporcionar al paciente un tratamiento a tiempo. A pesar que no es un eslabón importante en el estudio, cabe resaltar que se puede llegar a tener contacto de indirectamente con los autores de estudio.

En Colombia hay una serie de regímenes exceptuados en el sistema de Seguridad Social en Salud, por lo que tienen disposiciones distintas frente al pago de aportes. Este es el caso de Régimen Especial de Salud, el cual son aquellos sectores de la población que siguen rigiéndose por las normas de seguridad social concebidas con anterioridad a la entrada en vigencia de la Ley 100 de 1993; quienes se encuentran Fuerzas Militares, Magisterio, Policía, Ecopetrol y Universidades Públicas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El cáncer es una de las primeras causas de muerte a nivel mundial; en 2012 se le atribuyeron 8,2 millones de muertes. El 70% de todas las muertes por cáncer registradas en 2012 se produjeron en África, Asia, América Central y Sudamérica. Se prevé que los casos anuales de cáncer aumentarán de 14 millones en 2012 a 22 en las próximas dos décadas [20]. Por otro lado, de acuerdo con Minsalud se calcula que cada año se presentan en el mundo más de 11 millones de casos nuevos de cáncer, de los cuales alrededor del 80% se encuentran en países en desarrollo.

Para Colombia se estimaron 41.366 casos prevalentes en un año: 18.458 (44,6%) en hombres y 22.908 (55,4%) en mujeres. Entre los hombres las localizaciones más prevalentes fueron: próstata, colon recto, ano y estómago. En mujeres las localizaciones más prevalentes fueron: mama, cuello uterino y tiroides. En el área de influencia del estudio (Risaralda) hay aproximadamente 8700 personas con patologías oncológicas y en el caso de Pereira son en promedio 4300 casos.

La industria farmacéutica en Colombia ha enfrentado diferentes retos en su historia, y uno importante en la actualidad es el mercado, ya que hasta hace unos años la comercialización de medicamentos en el país

era 70% local y 30% la parte que se importaba, a diferencia de lo que pasa hoy, cuando siete de cada 10 medicamentos (90%) son importados según la Cámara de la industria farmacéutica de la ANDI, más aún para el caso de medicamentos oncológicos, que puede representar un 94%.

Para el caso de Pereira la cadena logística de medicamentos oncológicos presenta un flujo de aproximadamente de 250 referencias de productos, dos IPS especializadas (Liga Contra el Cáncer y Oncólogos de Occidente), dos IPS con servicios en el área médica (Hospital Universitario San Jorge y Clínica los Rosales) y una IPS con apoyo para recuperación postratamiento (Clínica Comfamiliar). Además, la ciudad tiene presencia de 2 de los principales operadores logísticos del país (Audifarma y Eve Distribuciones) que a su vez cumplen también el papel de gestores farmacéuticos.

Las principales causas de ruptura o de no conformidades en la cadena de suministro desde los operadores hacia las IPS son inexactitud en el pedido, pedidos incompletos, agotados o faltantes, incumplimiento en el lead time y medicamentos deteriorados durante el transporte. Las IPS presentan problemas con la dispensación, manipulación, control de inventarios, procesos de almacenamiento y con los servicios complementarios relacionados con las centrales de mezcla y el transporte de medicamentos a los pacientes en casa.

Las no conformidades que se presentan en las operaciones logísticas que conforman la cadena logística de medicamentos oncológicos en la ciudad de Pereira se pueden analizar y corregir de la siguiente manera, para los pedidos inexactos que suceden al equivocar dosis, enviar cantidades diferentes a las solicitadas o seleccionar medicamentos errados suele suceder por mala interpretación de los formatos (Información incompleta o ininteligible en la receta) o órdenes de compra, error humano, malas condiciones del área de trabajo. Teniendo en cuenta estos factores es necesario capacitar al personal en labores de selección e interpretación de formatos o archivos, como también adecuar los sistemas de picking, las áreas de trabajo y los protocolos para distinción de LASA para enviar los requerimientos de producto de forma adecuada, además se deben implementar sistemas de monitoreo y control para los medicamentos críticos.

Los pedidos incompletos o entregas parciales, ocurren al enviar los medicamentos en cantidades inferiores a las solicitadas o sin todas las referencias de productos pedidos, esto se genera debido a un despacho mal ejecutado, por un conteo mal realizado o por faltantes en el inventario, también es posible que la presencia u ocurrencia de productos averiados o deteriorados en la manipulación o transporte afecte las cantidades al final de los trayectos. Por ende, corroborar los inventarios con los productos almacenados es de vital importancia, capacitar y ejercer las políticas o protocolos de manipulación, actualizar los procesos de reaprovisionamiento para ver la rotación del medicamento y contar en la medida de lo posible con stock de seguridad puede ayudar a disminuir esta categoría.

Agotados o faltantes son posiblemente las causa más frecuente del rompimiento de la cadena, se pueden generar en cualquier punto del flujo logístico y a partir de él se ocasiona un efecto dominó para los subsiguientes eslabones; pueden darse desde un ámbito global por que un productor discontinúa un medicamento o por el retiro de licencias, desde una perspectiva organizacional puede ocurrir por el incumplimiento de los proveedores, mala planificación de adquisición, falta de gestión de la demanda, asincronía entre la demanda y la oferta en un periodo de tiempo y fallas en los sistemas de gestión del almacén o el inventario, esto abre la posibilidad para que ocurra el desabastecimiento, que se evidencia en es la cantidad insuficiente o nula de un producto en las posiciones de almacenamiento de cualquier eslabón. La manera en que las instituciones pueden mitigar esta problemática empieza desde la realización de una buena gestión de la demanda apoyada en pronósticos (forecast), estudios de mercado y acceso a nuevas tecnologías farmacéuticas que replacen faltantes, realizando procesos constantes de evaluación de proveedores y realizando una adecuada gestión de compras.

Los tiempos de entrega de los proveedores (Lead Time) se han vuelto en los últimos tiempos uno de los principales factores en los procesos de negociación en los mercados globales, no en vano este indicador tiene un impacto directo en la percepción del servicio de los clientes hacia sus proveedores, más aún en el caso de medicamentos donde la vida o la calidad de vida de un ser humano muchas veces depende que una medicina sea suministrada a tiempo. Cuando un proveedor incumple con los tiempos pactados en los

contratos de compra y excede los tiempos de entrega pone un exceso de presión en el flujo logístico ocasionando por lo general la activación de planes de reacción que elevan los costos de operación para la organización.

Pueden existir muchas razones para que el tiempo de entrega de un proveedor se extienda, por ejemplo, problemas no controlables (Accidentes, problemas ambientales, sociales, orden público) o controlables (Programación de salidas, planeación de rutas, mantenimiento, gestión documental tanto de los vehículos como de la carga).

Los medicamentos deteriorados durante el transporte se presentan principalmente porque los medios utilizados no cumplen con los estándares mínimos para mantener y proteger las características químicas y físicas de los medicamentos al momento de ser trasladados, cuando este proceso presenta problemas el producto llega en pésimas condiciones y se tiene que dar de baja, causas como son una mala disposición y aseguramiento en los sistemas de transporte, malas condiciones por falta de mantenimiento o poca adecuación para cumplir con la labor (cadena de frío, control de luz, vibraciones, toxicidad, gases, etc.). Por tal motivo es necesario capacitar a las personas responsables del transporte en la manipulación, acomodación y en la forma de apilar los productos en el vehículo, además deben asegurarse de mantener la temperatura adecuada de la carga, conducir de manera preventiva, no afectar la identificación, etiquetado o presentación de los medicamentos y prevenir la contaminación por contacto (Contaminación Cruzada) con otros productos.

6. CONCLUSIONES

El modelo permitió realizar una representación estructurada de los procesos logísticos y de los actores de la cadena de suministro y distribución, analizando los procesos que desarrollan y la conexión entre ellos. Se concluyó que las principales causas de ruptura en la cadena de suministro desde los operadores hacia las IPS son inexactitud en el pedido, pedidos incompletos, agotados o faltantes, incumplimiento en el lead time y medicamentos deteriorados durante el transporte y que las IPS presentan problemas con la dispensación, manipulación, control de inventarios, procesos de almacenamiento y con los servicios complementarios relacionados con las centrales de mezcla y el transporte de medicamentos a los pacientes en casa.

Se analizó que los actores de la cadena logística presentan problemas entre ellos, como inadecuada gestión del proceso de devolución creando discrepancia o diferencia entre el inventario y las existencias en almacenamiento, un flujo contraproducente de información, alteración en las políticas de salida (primero en vencer PEPS); acarreando problemas como obsolescencia en los inventarios, deterioros, vencimiento, sobre stock de medicamentos, utilización de lugar de almacenamiento de otra referencia aumentando la posibilidad de dispensar mal los pedidos y aumentando los tiempos de entrega de medicamentos.

Los indicadores KPI son una herramienta fundamental que sirve como base para evaluar y controlar las actividades logísticas que se encuentra en el proceso de suministro y distribución de medicamentos, los cuales, ayudarán a definir el estado actual del proceso, encontrar problemas y sus causas, además sirven de apoyo para la toma de decisiones. La implementación de los indicadores ayudará a prevenir rupturas en la cadena donde impactará positivamente en los procesos logísticos, asegurando la continuidad y flujo de medicamentos para la aplicación del tratamiento, que a su vez aumenta la probabilidad de éxito de estos, lo cual repercute en la expectativa y calidad de vida del paciente.

REFERENCIAS

- [1] H. A. Medina Puerto, «Propuesta para la gestión logística de medicamentos e insumos médicos bajo el enfoque de "Última Milla"; estudio de caso: Distribución de medicamentos a IPS en la zona urbana Bogotá,» 2018, Recuperado: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_industrial/60
- [2] J. Aguilar, Subcontratación de servicios logísticos, Marge Books, 2001.
- [3] D. I. n. d. C. d. I. D. Logística, 2020.

- [4] M. K. M. Carol J. Robinson, «Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice,» *International Journal of Production Economics*, vol. 96, n° 3, p. 319, 2005.
- [5] B. Ronald H, *Logística Administración de la cadena de suministro*, México: Pearson Educación, 2004.
- [6] A. & C. I. J. Paulraj, «Strategic buyer-supplier relationships, information technology and external logistics integration,» *Journal of Management*, vol. 30, n° 1, 2007.
- [7] S. A. y. A. D. G. d. C. d. S. y. M. D. r. d. S. & P. d. Accenture., «The Logistic World,» Recuperado: <https://thelogisticsworld.com/historico/compras-alineadas-eslabon-estrategico-de-la-cadena/>
- [8] J. P. C. L. G. A. H. C. V. Apaza Paco, «Logística de almacenamiento de materia prima en la industria farmacéutica,» *CON-CIENCIA*, vol. 3, n° 1, 2015.
- [9] R. G. Schroeder, «Administración de operaciones conceptos y casos contemporáneos,» México, Mc Graw Hill, pp. 355-356.
- [10] P.-S. R. d. A.-O. d. Z. J. E.-R. T. E.-G. J. Barbero A, «Demanda de medicamentos de prescripción sin receta médica,» vol. 37, n° 2, pp. 70-80, 2006.
- [11] L. Terry, «The Big Chill: 10 Trends in Cold Chain Logistics,» 2015. Recuperado: <https://www.inboundlogistics.com/cms/article/the-big-chill-10-trends-in-cold-chain-logistics/>
- [12] A. M. d. M. d. T. e. e. Á. Sanitario, «Guía de buenas prácticas para trabajadores profesionalmente expuestos a agentes citostáticos,» *Escuela nacional de medicina del trabajo*, 2014.
- [13] L. A. M. García, «Indicadores de la gestión logística,» Bogotá: Ecoe Ediciones, 2008, p. 3.
- [14] L. A. M. García, *Indicadores de la gestión logística*, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2008, p. 8.
- [15] airpharmlogistics, «airpharmlogistics,» 2019, Recuperado: <https://www.airpharmlogistics.com/que-es-operador-logistico/>
- [16] J. E. C. E. O. Bibiana Margarita Vallejo, «Estudio descriptivo de los operadores logísticos como componentes estratégicos dentro de la cadena de valor del medicamento en Bogotá,» *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.*, vol. 39, n° 2, pp. 168-187, 2010.
- [17] R. Hernández, «Definición del alcance de la investigación,» de *Metodología de la Investigación: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta*, Mexico, McGraw-Hill, 2018, pp. 106-108.
- [18] D. B. Van Dalen y W. J. Meyer, «Manual de Técnica de la Investigación Educativa,» Barcelona: Paidós Educator, 1981.
- [19] Ó. Bernal y C. Gutiérrez, «La Salud en Colombia: Logros, Retos y Recomendaciones,» Bogotá: Ediciones Uniandes, 2012.
- [20] Ministerio de Salud y Pretección Social, «Observatorio Nacional de Cáncer: Guía Metodológica,» Ministerio de Salud y Pretección Social, Bogotá, 2018.
- [21]

Fases propuestas para el diseño y construcción de un modelo de Gestión del Conocimiento

Luciano Nicolás Straccia¹

Adriana Maulini Buño²

Cecilia Ramacciotti³

María Florencia Pollo-Cattaneo⁴

*Universidad Tecnológica Nacional
Argentina*

La Gestión del Conocimiento es un proceso a través del cual las organizaciones logran descubrir, utilizar y mantener el conocimiento, para alinearlos a las estrategias de negocio para la obtención de ventajas competitivas. Existen diversos modelos para un Sistema de Gestión de Conocimiento en las organizaciones y desde diversas perspectivas: roles y responsabilidades de las personas, aspectos y cultura organizacional, actividades a llevar a cabo, gobernanza, representación del conocimiento y tecnologías. En este trabajo se analiza las similitudes y diferencias que tienen los principales modelos de Gestión de Conocimiento en cuanto a sus actividades propuestas; se lleva a cabo una normalización terminológica y se presenta una propuesta de las fases fundamentales que todo modelo de Gestión del Conocimiento debería considerar. Se presentan y analizan los modelos más reconocidos: Nonaka y Takeuchi, Wigg, Sveiby, Earl, Kerschberg, Bustelo y Amarilla, Mc Elroy, la Guía de buenas prácticas en gestión del conocimiento de CEN, Pons, KMC y K-TSACA, y se incorporan nuevos modelos hallados en la Asociación for Computing Machinery ACM, el Institute of Electrical and Electronic Engineers IEEE, Directory of Open Access Journals DOAJ y Science Direct.

¹ Grupo de Estudios en Metodología para Ingeniería de Software y Sistemas de Información GEMIS.
Contacto: lstraccia@frba.utn.edu.ar

² Grupo de Estudios en Metodología para Ingeniería de Software y Sistemas de Información GEMIS.
Contacto: adri.maulini@gmail.com

³ Grupo de Estudios en Metodología para Ingeniería de Software y Sistemas de Información GEMIS.
Contacto: c.a.ramacciotti@gmail.com

⁴ Grupo de Estudios en Metodología para Ingeniería de Software y Sistemas de Información GEMIS.
Contacto: flo.pollo@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo busca proponer las fases fundamentales para toda metodología de Gestión del Conocimiento. Para ello, es necesario definir previamente qué es el Conocimiento y la Gestión del Conocimiento y analizar el concepto de metodología y fases, junto con la noción de ciclos de vida.

En el marco de la Gestión del Conocimiento existen diversos modelos que son analizados en el presente trabajo para identificar las fases que proponen buscando dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿qué similitudes y diferencias tienen los principales modelos de gestión de conocimiento en cuanto a sus fases propuestas? ¿cuáles son las fases más importantes que debería considerar todo modelo de gestión del conocimiento?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Conocimiento

Shannon [1] y Weaver [2] introdujeron los conceptos de dato e información, aunque con algunas diferencias terminológicas, incorporando ideas de lo *físico* (lo captable con el sentido) y el *significado*. Timpson [3-6] retoma más recientemente debates respecto a estos conceptos. Las nociones de dato e información fueron incorporadas en la denominada Jerarquía DIKW, presentada por Ackoff [7], que sostiene que se trata de una cadena jerárquica en la que cada concepto añade valor al previo. Esta Jerarquía, que puede hallarse en la Figura 1, tiene como elemento base al dato (*data*); un nivel superior, a la información (*information*); posteriormente, al conocimiento (*knowledge*) y en el nivel superior, la sabiduría (*wisdom*).

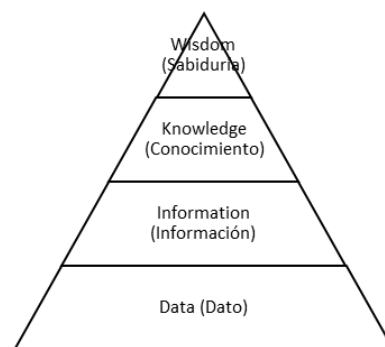


Figura 1. Pirámide de la jerarquía DIKW

Para Díaz y Millán [8] el conocimiento se define como: *la mezcla de creencias cognitivas y contextualizadas, perspectivas, juicios, metodologías, información, experiencias y expectativas hechas sobre un objeto, que se adaptan y potencializan por la mente de un individuo (conocedor)*. Por otro lado, para Rueda Martínez [9] el conocimiento provee las bases que permiten generar una visión crítica del entorno. Es decir, gracias al conocimiento se puede entender e interpretar el entorno.

2.2 Gestión del Conocimiento

La Gestión del conocimiento GC es un proceso a través del cual las organizaciones logran descubrir, utilizar y mantener el conocimiento, para alinearlo a las estrategias de negocio para la obtención de ventajas competitivas [10]. Perez y Urbáez [11] definen la GC como *un enfoque gerencial o disciplina emergente que busca de manera estructurada y sistemática aprovechar el conocimiento generado para alcanzar los objetivos de la organización y optimizar el proceso de toma de decisiones*.

A lo largo de la historia, para llevar a cabo un proceso de Gestión de Conocimiento en las organizaciones, se han propuesto diversos modelos. Estos modelos de GC brindan diferentes elementos, desde la estructura de la organización y actividades hasta técnicas y tecnologías aplicables para su ejecución.

En [12] se analizan diferentes dimensiones para un modelo de Gestión de Conocimiento, basado en Gomez y García [13], Barceló [14], Meneses [15] y Milton [16] (otros autores proponen algún abordaje específico sin

el marco general del modelo). En dicho trabajo se presentan las 6 dimensiones fundamentales para la definición de un modelo de gestión de conocimiento: roles y responsabilidades de las personas, aspectos y cultura organizacional, proceso (como las actividades a llevar a cabo durante la GC), gobernanza, representación del conocimiento y tecnologías.

2.3 Ciclo de vida

El concepto de ciclo de vida es utilizado tradicionalmente en la biología, como secuencia de etapas por las cuales pasa un individuo u organismo. En [17] pueden hallarse diferentes consideraciones sobre el término, teniendo en común todas ellas la existencia de estados por los cuales pasa dicho individuo u organismo que van desde su concepción hasta su muerte. En mercadotecnia este concepto fue introducido por Theodore Levitt [18] con similar noción, otorgando a los productos el siguiente ciclo de vida: desarrollo, crecimiento, madurez y declive de un producto.

Esta relación entre aspectos biológicos y mercadotecnia también puede hallarse en la definición de *life cycle* en lengua inglesa: *a series of stages through which something (such as an individual, culture, or manufactured product) passes during its lifetime* [19].

En la industria del software, Steve McConnell [20] lo describe como *todas las actividades entre el momento en que la versión 1.0 de un sistema comienza a funcionar como un destello en los ojos de alguien y el momento en que la versión 6.74b finalmente toma su último aliento en la última máquina de clientes*. En similar forma, en [21] se define como *las distintas fases por las que pasa el software desde que nace una necesidad de mecanizar un proceso hasta que deja de utilizarse el software que sirvió para ese objetivo, pasando por las fases de desarrollo y explotación*.

Sin embargo, a pesar de hacer referencia a las actividades y fases, McConnell encuentra en el ciclo de vida estados de producto expresados en términos de versiones, mientras que Frakes pareciera referir a desarrollo y explotación como términos asociados de similar forma a lo que Levitt utiliza como desarrollo y crecimiento. Por lo tanto, en ambos casos no explican cuáles son específicamente las actividades que se desarrollan en el marco de la Ingeniería del Software, sino los estados de vida de un producto.

2.4 Metodologías y fases

Para [22], una metodología de desarrollo de sistemas *ejecuta la etapa de desarrollo de sistemas del ciclo de vida del sistema. La metodología es el proceso estándar para construir y mantener ese sistema y todos los demás sistemas de información a través de sus ciclos de vida*. En [23] se define una metodología como *una estrategia global para enfrentarse con un proyecto*. Entre los elementos que forman parte de una metodología se encuentran: sus fases (tareas), productos (entradas y salidas de cada fase), procedimientos y herramientas y criterios de evaluación del proceso y del producto.

Según la definición preexistente, las metodologías se encuentran conformadas por fases o etapas. Según la bibliografía que sea escogida, podrá hallarse el uso de uno u otro término, a veces de manera intercambiable; incluso compañías de la Industria del Software, como Microsoft e IBM los utilizan de manera contraria: para IBM *las etapas se subdividen en fases* [24], mientras para Microsoft, *una fase representa una colección de etapas* [25]. En el presente trabajo se opta por el uso del término *fase* para dar continuidad a su uso realizado en trabajos previos de sus autores.

Lam Diaz [26] afirma que una metodología *implica un conjunto de pasos, o etapas secuenciadas, enlazadas de manera lógica unas con otras. Sin embargo, no existe un único esquema de pasos a seguir, pues pueden existir mayor o menor cantidad de etapas, la cuestión es el contenido de cada una de ellas*. Si bien la afirmación corresponde a la investigación en áreas de la salud, es aplicable al tópico de este trabajo.

En este trabajo no se busca construir un esquema de pasos único, ni proponer alguno, sino indagar en el contenido de cada uno de esos pasos, etapas o fases. Así, las mismas fases podrían ser utilizadas para metodologías diferentes.

3. MÉTODO

Para el presente trabajo se consideran y analizan diversos modelos de gestión del conocimiento. En primer lugar, dando continuidad a trabajos previos, se seleccionan algunos de los modelos de gestión de conocimiento más reconocidos en la industria y que fueron objeto de análisis previo y luego se incorporan modelos de publicación reciente en la bibliografía internacional.

A partir de los modelos seleccionados se lleva adelante el siguiente proceso:

1. Se analizan las dimensiones que abordan cada uno de los modelos
2. Sobre los modelos que presentan elementos vinculados a la dimensión de procesos, se identifican la metodología y fases propuestas
3. Se comparan las fases propuestas entre diferentes modelos
4. Se presentan las fases fundamentales recomendadas para una metodología para la implementación de Gestión de Conocimiento

En el proceso de comparación se propone una normalización terminológica. La normalización terminológica surge de la preocupación en el seno de la ciencia y la tecnología por las posibles confusiones en la utilización de los términos y el deseo de establecer criterios lingüísticos claros para la designación y la descripción de los conceptos [27], aplicándose exclusivamente en el terreno de las especialidades y nunca en la lengua común [28] y debiendo considerarse que (...) los términos son unidades semióticas compuestas de concepto y denominación, cuya identidad se justifica sólo dentro de un campo de especialidad; los términos se analizan a partir del concepto que representan y, por ello, se asume que el concepto precede a la denominación; (y) el objetivo de la terminología es la normalización conceptual y denominativa y su finalidad es garantizar la precisión de la comunicación profesional. [27, 29].

Esta normalización terminológica no busca precisar el significado de las palabras ni dar reglas precisas [30], sino que pretende ser una herramienta para la comunicación técnica y científica [31].

4. RESULTADOS

4.1 Modelos tradicionales de Gestión del Conocimiento

En [32, 33] se presentan y analizan los modelos de gestión de conocimiento más reconocidos: Nonaka y Takeuchi, Wigg, Sveiby, Earl, Kerschberg, Bustelo y Amarilla, Mc Elroy, la Guía de buenas prácticas en gestión del conocimiento de CEN, Pons, KMC y K-TSACA.

Nonaka y Takeuchi [34] proponen un modelo de GC que validan con casos de estudio en organizaciones de Japón. Centran su modelo en la importancia de convertir el conocimiento implícito en conocimiento explícito. Las actividades definidas para la gestión del conocimiento son: socialización (el conocimiento es compartido con otras personas), externalización (implica convertir el conocimiento compartido en la fase anterior en conocimiento explícito), combinación (consiste en combinar conocimiento desde distintas fuentes de conocimiento explícito), internalización (es la recepción del conocimiento por una persona, desde una fuente de conocimiento explícito o desde otra persona).

Wiig [35] presenta un modelo de GC que consta de cuatro etapas principales relacionadas al conocimiento: construir, retener, agrupar y utilizar. El modelo de Wiig es muy general, describe etapas y actividades generalizadas, pero no especifica pasos detallados o procesos para gestionar el conocimiento en la organización y queda en la misma definir la forma en la que se adaptaría este modelo.

Sveiby [36] define un modelo de GC orientado a guiar la generación de una estrategia corporativa, afirmando que el conocimiento es un activo intangible, y al contrario de los activos tangibles, que se devalúan a medida que se usan, el conocimiento adquiere valor cuando se usa y se devalúa como activo cuando entra en desuso. El modelo considera tres aspectos: la estructura interna de la organización, la

estructura externa y las competencias individuales, y se centra en la relación entre estos aspectos y la transferencia de conocimiento entre ellos.

Earl [37] propone un modelo de GC dividido en lo que llama *escuelas de gestión del conocimiento*. Las llamadas escuelas en este modelo son ramas o variantes de este, que se pueden combinar a conveniencia de la organización, según las prioridades y objetivos de esta. Cada escuela del modelo de Earl tiene una filosofía, ésta indica hacia donde se orienta la escuela, es decir, qué es lo que se busca al aplicarla. Las escuelas son: Sistemas, Cartográfica, Ingeniería, Comercial, Organizacional, Espacial y Estratégica. Se puede observar que este modelo, aunque es flexible, no especifica un proceso determinado para implementar cada una de las escuelas que lo componen.

El modelo creado por Mc Elroy [38] se basa en buscar espacios vacíos de conocimiento para crear, a partir de este hallazgo, conocimiento sólido. El modelo incluye dos actividades principales: producción del conocimiento e integración del conocimiento. La primera implica todas aquellas actividades necesarias para crear nuevo conocimiento y la segunda, aquellas actividades necesarias para integrar el conocimiento nuevo a las bases de conocimiento existentes en la organización.

Kerschberg [39] propone un modelo para gestionar el conocimiento, teniendo en cuenta que el mismo puede provenir de fuentes heterogéneas. El modelo de Kerschberg presente tres capas: capa de presentación, capa de gestión del conocimiento y capa de datos, haciendo referencia al contenido y tecnología factible de ser utilizada en la GC. Además, describe algunas actividades como adquisición, refinamiento, almacenamiento y recuperación, distribución y presentación.

El modelo de Bustelo y Amarilla [40] propone un modelo de GC enfocado principalmente en la gestión de la información, haciendo énfasis en el hecho de que sin una adecuada gestión de la información no puede existir la GC. Para ellos, el centro de la gestión de la información es a su vez la gestión de la documentación (información que queda plasmada en documentos). Indican que la documentación puede ser de 3 tipos: interna (documentos que surgen de la actividad de la organización), externa (proviene de fuentes de información externa que los miembros de la organización necesitan consultar a menudo) y pública (información que la organización produce de cara al público). En este modelo no se definen pasos ni procesos detallados que la organización debe seguir, sino simplemente una estructura global de lo que el modelo considera como GC.

El Comité Europeo de Estandarización ha publicado un modelo de GC llamado *Guía de buenas prácticas en gestión del conocimiento* [41]. Consta de tres capas principales: foco de negocios (representa los procesos de la organización, los cuales son el contexto organizacional en donde el conocimiento crítico es creado y aplicado), las actividades centrales (se identifican 5 actividades centrales relacionadas con el conocimiento: identificar, crear, almacenar, compartir y utilizar) y facilitadores (se dividen en dos categorías principales que son: capacidades personales de conocimiento y capacidades organizacionales de conocimiento).

En Pons y otros [42] se presenta un modelo de GC para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos. Las etapas que define este modelo están basadas en las definidas por Nonaka y Takeuchi, de manera cíclica: interiorización, socialización, exteriorización, combinación y seguimiento. Para soportar el modelo, propone la existencia de una colección de datos organizada por casos, la creación de una red de expertos donde se sepa quiénes son las personas con mayor conocimiento en áreas determinadas y el diseño de un sitio web para la difusión del conocimiento.

Además de los modelos ya mencionados, existen modelos generales más actuales que están basados en los ya vistos y que las diferencias con los anteriores no son significativas. Entre estos modelos se puede destacar el Modelo K-TSACA [43], el cual, a partir de modelos existentes, proponen nuevos modelos.

4.2 Dimensiones abordadas

Considerando las 6 dimensiones propuestas en [12] y mencionadas en el marco conceptual: roles y responsabilidades de las personas, aspectos y cultura organizacional, proceso (como las actividades a llevar

a cabo durante la GC), gobernanza, representación del conocimiento y las tecnologías, se identifican las dimensiones en cada uno de los modelos presentados; el resultado puede hallarse en Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de los modelos de GC

Modelo	Dimensiones que aborda
Nonaka y Takeuchi	Proceso
Wigg	Proceso
Sveiby	Aspectos organizacionales
Earl	Representación del conocimiento
Mc Elroy	Tecnologías, Representación del conocimiento y Procesos
Kerschberg	Tecnología y Procesos
Bustelo y Amarilla	Ninguno
CEN	Personas y Procesos
Pons – ISECO	Representación del conocimiento
K-TSACA	Procesos

Los modelos que abordan la dimensión de proceso y que son objeto del presente trabajo son: Nonaka y Takeuchi, Wigg, Mc Elroy, Kerschberg, CEN y K-TSACA. Sobre estos modelos se presentan las fases que definen.

4.3 Modelos de Gestión del Conocimiento en la bibliografía reciente

Sin intentar constituirse en una revisión sistemática de la literatura, pero siguiendo un proceso de búsqueda ordenado, se ha realizado una búsqueda sobre diversos artículos de gestión del conocimiento con el objetivo de hallar nuevos modelos que propongan metodologías y fases que complementen a los modelos más tradicionales. Así, se realiza una búsqueda sobre la Association for Computing Machinery ACM, el Institute of Electrical and Electronic Engineers IEEE, Directory of Open Access Journals DOAJ y Science Direct. Para las primeras 3 fuentes la búsqueda es realizada sobre el año 2019, mientras que en Science Direct la búsqueda corresponde a los años 2017 y 2018. Los hallazgos de dichas búsquedas se presentan a continuación.

Cepeda y otros [44] proponen tres procesos para la gestión del conocimiento creando una dinámica que resulta en la creación de más valor para los consumidores. Se enfocan en desarrollar un modelo que traiga más entendimiento en como una empresa puede dar más valor agregado a sus clientes a través de la gestión del conocimiento.

Zouari y otros [45] analizan los sistemas de gestión del conocimiento desde cuatro aspectos: tecnológico, humano, procesos y contexto. Proponen un modelo conceptual que demuestra que esos aspectos dependen de una estrategia de gestión del conocimiento, de las actividades de GC y del ambiente externo. Hacen énfasis en que las herramientas de software por sí solas no son suficientes. En función de cada uno de esos aspectos proponen diversas actividades.

Cordova y otros [46] proponen un modelo de GC para compañías que trabajan en el mercado de seguros chileno, haciendo énfasis en la interacción de la gente con la tecnología, e identificando niveles de experticia del conocimiento dentro de la compañía para distribuir los procesos y roles de GC. El modelo se proyecta considerando que en las organizaciones se genera un ambiente de confianza, aprendizaje en red, intercambio de conocimiento y experticia, liderazgo participativo, aprendizaje colaborativo, *feedback* constructivo e interacción de la gente sin importar su nivel de experticia.

Paschek y otros [47] presentan un modelo de GC paralelo al proceso de Gestión de procesos de negocio BPM, haciendo énfasis en la importancia que tiene gestionar el conocimiento en paralelo a la gestión del negocio para poder garantizar que esta última sea la adecuada ante los cambios constantes ante los que se enfrentan las organizaciones.

Bongku and Kurniawan (2019) [48] presentan un sistema de gestión de conocimiento para una empresa consultora de IT de Indonesia, pero no definen un modelo de procesos específico, sino que retoman el modelo de Nonaka y Takeuchi de mecanismos de transferencia de conocimiento.

Raudeliūnienė y Kordab [49] evalúan la influencia del liderazgo orientado al conocimiento sobre los procesos de gestión del conocimiento y la influencia de estos procesos sobre la performance de empresas consultoras y auditoras de Medio Oriente. Los autores proponen un modelo de procesos que involucra las siguientes fases: creación, adquisición, almacenamiento, compartir y aplicación.

Todericiu y Boanta [50] analizan la retención de conocimiento en pequeñas y medianas empresas y proponen un modelo con las siguientes actividades: creación, adquisición, almacenamiento, recuperación y uso. Almujally y Joy [51] proponen un marco conceptual para un nuevo método para mejorar el intercambio de conocimientos y colaboración entre instructores académicos, mediante el despliegue de un conocimiento mediante herramientas Web 2.0.

4.4 Fases propuestas

Entre aquellos modelos que tratan la dimensión de procesos, pueden encontrarse diversas fases que son presentadas en las Tablas 2 y 3, en las cuales se mantiene el idioma inglés o español de las publicaciones originales, con el objetivo de no distorsionar el análisis.

Tabla 2. Fases propuestas en los modelos de GC tradicionales

Modelo	Fases propuestas
Nonaka y Takeuchi	socialization, externalization, combination, internalization
Wiig	build, holding/storage, pooling, applying
Mc Elroy	individual and group learning, claim formulation, acquisition, validation, integration
Kerschberg	acquisition, refinement, storage, retrieval, distribution, presentation
CEN	identificar, crear, almacenar, utilizar, compartir
K-TSACA	transfer, storage, application, creation, acquisition

Tabla 3. Fases propuestas en otros modelos de GC

Modelo	Fases propuestas
Cepeda	Absorptive capacity, transfer, application
Paschek y otros	Creation, acquisition, refinement, sharing, storage, transfer, utilization
Zouari y otros	Combination, socialization, externalization, internalization, transfer, guidance, routines execution
Cordova	socialization, externalization, combination, internalization
Raudeliūnienė y Kordab	creation, acquisition, storage, sharing, application
Todericiu y Boanta	creation, acquisition, storage, retrieval, use
Almujally y Joy	creation, acquisition, representation, storing, dissemination, use

4.5 Análisis y comparativa de las fases propuestas

El modelo de Nonaka y Takeuchi es uno de los trabajos fundamentales para la Gestión del Conocimiento, proponiendo diferentes tipos de conocimiento (explícito e implícito) y cuatro actividades o formas de compartir el conocimiento: socialización, externalización, combinación e internalización. A fines del presente trabajo, se utiliza el Socialization-Externalization-Combination-Internalization SECI para referir a este conjunto de actividades, que pueden hallarse en la Figura 2. Todas estas actividades también se encuentran agrupadas en lo que Wiig denomina *build*, que es definido por el autor como la recuperación de conocimiento tácito y explícito desde fuentes internas y externas.

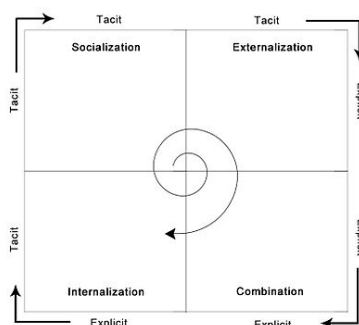


Figura 2. Actividades SECI de Nonaka y Takeuchi

Entre las fases propuestas por Wiig se identifica una denominada *pooling knowledge* definida como el uso apropiado de sistemas de gestión del conocimiento para asegurar el intercambio entre equipos o grupos de expertos, asignable a la propuesta de Kerschberg para la fase de *distribution*. A fines del presente trabajo, se prefiere el término *compartir* adoptado por el CEN.

A partir del análisis precedente, en la Tabla 4 puede observarse la normalización terminológica de fases para los modelos de Nonaka y Takeuchi y Wiig.

Tabla 4. Fases propuestas en los modelos de GC de Nonaka y Takeuchi y Wiig

Modelo	Fases del modelo	Normalización terminológica
Nonaka y Takeuchi	socialization, externalization, combination, internalization	SECI
Wigg	build, holding/storage, pooling, applying	SECI, almacenar, compartir, aplicar

En cuanto al modelo de Kerschberg, dada su orientación tecnológica, algunos términos denotan su aplicación específica al uso de las tecnologías, que no es objeto de este trabajo, para el cual se interpreta que la recuperación y la presentación referenciadas en su trabajo son actividades propias de un sistema tecnológico asociado y no al proceso general de gestión del conocimiento. Esto puede hallarse en la recuperación (propuesta por el autor como la obtención de la información desde el medio de almacenamiento), el almacenamiento propiamente dicho y su presentación a través de alguna tecnología de interfaz de usuario para su uso y aplicación. A fines del presente trabajo y considerando las propuestas de otros actores con orientaciones que no son específicamente tecnológicas, se considera el almacenamiento como una fase fundamental, la cual irá acompañada de todas las actividades propias de la interacción con dispositivos y medios técnicos.

Sin embargo, Kerschberg propone una actividad específica más en el proceso de gestión de conocimiento, que es el refinamiento. Esta actividad implica para el autor que la información almacenada es indexada y se crean los metadatos en término de conceptos del dominio, relaciones y eventos, incorporando esta actividad para llevar a cabo un proceso más eficiente de almacenamiento. Además, se lleva a cabo minería de datos y técnicas de análisis de datos son procesados para el descubrimiento de patrones, detectar *outliers* y asociar metadatos con descriptores de los objetos. Ante esto, es relevante considerar las particularidades del refinamiento como un valor agregado que el autor brinda a otros conceptos de almacenamiento. La normalización tecnológica propuesta para el modelo de Kerschberg puede hallarse en la Tabla 5.

Tabla 5. Fases propuestas en el modelo de GC de Kerschberg

Modelo	Fases del modelo	Normalización terminológica
Kerschberg	acquisition, refinement, storage, retrieval, distribution, presentation	adquirir, refinar, almacenar, compartir

El modelo K-TSACA incorpora a las fases ya presentadas por los modelos precedentes, la aplicación, como el uso concreto del conocimiento aplicándolo en los procesos organizacionales, y la creación y adquisición. Para el autor del modelo, siguiendo a Nonaka y Takeuchi [34], Wan [52] y Frost [53], el conocimiento es creado a través de la educación, interacción, prácticas y colaboración y otros mecanismos de transferencia del conocimiento. Basado en [54] también incluye el análisis de *workflow* de información (incluible en la propuesta de refinamiento de Kerschberg) y el mapeo de procesos y competencia. Respecto de la adquisición, lo considera como la obtención del conocimiento externo:

(...) la actividad de aceptar conocimiento del entorno externo y convertirlo en un commodity que pueda ser utilizado dentro de la organización (...); el proceso incluye localizar, acceder, capturar y recopilar conocimiento de clientes, competidores, proveedores y otras fuentes de conocimiento.

A diferencia de la actividad de búsqueda derivada de la necesidad de conocimiento que proponen algunos modelos, el modelo CEN plantea acciones proactivas para la incorporación de conocimiento independientemente de la identificación de su necesidad en las actividades propias de la organización, asimilables a actividades relacionadas con la vigilancia tecnológica, definida por la UNE como *un proceso organizado, selectivo y permanente, de captar información del exterior y de la propia organización sobre*

ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento para tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios [55]. Por lo tanto, la creación puede iniciarse en una necesidad específica (fase de identificar) o en una actividad independiente de ella.

Tanto K-TSACA como CEN, por lo tanto, incorporan las nociones de producción de conocimiento basado en la búsqueda y análisis del ambiente externo, como la producción interna en la organización. La diferencia entre ambos modelos radica en que K-TSACA define ambas producciones como fases diferentes, mientras que el CEN las propone como una única fase de creación, incorporando la adquisición dentro de ella. Así, pueden considerarse acciones diferenciales, con estrategias y técnicas diferentes según las fuentes del conocimiento, tal como puede observarse en la Figura 3.

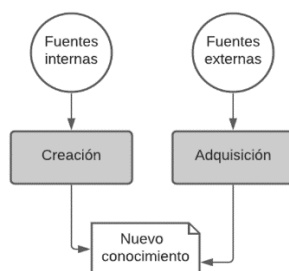


Figura 3. Fases según origen del conocimiento

En la Tabla 6 puede hallarse la normalización terminológica para los modelos del CEN y K-TSACA.

Tabla 6. Fases propuestas en los modelos de GC de CEN y K-TSACA

Modelo	Fases propuestas	Normalización terminológica
CEN	identificar, crear, almacenar, utilizar, compartir	identificar, crear, adquirir, almacenar, aplicar, compartir
K-TSACA	transfer, storage, application, creation, acquisition	transferir, almacenar, aplicar, crear, adquirir

De igual manera que los modelos anteriores, Mc Elroy propone una fase de adquisición en la cual incluye la búsqueda y recuperación de conocimiento desde sistemas externos, distinguiéndola del aprendizaje grupal e individual, tal como K-TSACA y CEN. La integración es la aplicación concreta del conocimiento y su incorporación en los procesos organizacionales como también propone K-TSACA.

Como afirma Mohajan [56]: *una de las grandes fortalezas del ciclo de McElroy es la descripción clara de cómo el conocimiento es evaluado y se toma una decisión consciente sobre si se integrará o no en la memoria organizacional. En este ciclo, la validación del conocimiento es un paso que claramente distingue GC de la gestión de documentos. (...) Se enfoca sobre los procesos para identificar el contenido del conocimiento que es de valor para la organización y sus empleados.* La normalización terminológica para el modelo de Mc Elroy puede hallarse en la Tabla 7.

Tabla 7. Fases propuestas en el modelo de GC de Mc Elroy

Modelo	Fases del modelo	Normalización terminológica
Mc Elroy	individual and group learning, acquisition, validation, integration	aprender, crear, adquirir, validar, aplicar

Entre los modelos recientes relevados y presentados, y la Tabla 3, se encuentran diversas actividades ya consideradas en modelos anteriores: socializar, internalizar, externalizar, combinar SECI, transferir, aplicar (o usar/utilizar), crear, adquirir, refinar, compartir, almacenar y recuperación. A continuación, se analizan algunos hallazgos diferenciales entre los modelos presentados.

Cepeda presenta una fase del proceso de gestión del conocimiento denominada *absorptive capacity*, que coincide con el concepto de adquisición que presentan otros autores.

Zouari retoma las fases de Nonaka y Takeuchi, incorpora la transferencia, ya existente en otros modelos y las fases de *guidance* y *routines execution* corresponden a la aplicación del conocimiento en las actividades de la organización.

Almujally y Joy incorporan dos términos no utilizados por otros autores: *representation* y *dissemination*. El primero tiene para los autores un significado técnico de la representación en estructuras de almacenamiento, mientras que el segundo es similar al uso de *sharing* de otros autores. En la Tabla 8 se observa la normalización terminológica para los modelos relevados en la bibliografía reciente.

Tabla 8. Fases propuestas en los modelos más recientes relevados

Modelo	Fases del modelo	Normalización terminológica
Cepeda	Absorptive capacity, transfer, application	adquirir, transferir, aplicar
Paschek y otros	Creation, acquisition, refinement, sharing, storage, transfer, utilization	crear, adquirir, refinar, compartir, almacenar, transferir, aplicar
Zouari y otros	Combination, socialization, externalization, internalization, transfer, guidance, routines execution	SECI, transferir, aplicar
Cordova	socialization, externalization, combination, internalization	SECI
Raudeliūnienė y Kordab	creation, acquisition, storage, sharing, application	crear, adquirir, almacenar, compartir, aplicar
Todericiu y Boanta	creation, acquisition, storage, retrieval, use	crear, adquirir, almacenar, aplicar
Almujally y Joy	creation, acquisition, representation, storing, dissemination, use	crear, adquirir, almacenar, compartir, aplicar

4.6 Resultados de la normalización terminológica

El resultado del análisis presentado en la sección anterior puede hallarse compilado en la Tabla 9.

Tabla 9. Normalización terminológica de las fases propuestas

Modelo	Normalización terminológica
Nonaka y Takeuchi	SECI
Wigg	SECI, almacenar, compartir, aplicar
Kerschberg	adquirir, refinar, almacenar, compartir
CEN	identificar, crear, adquirir, almacenar, aplicar, compartir
K-TSACA	transferir, almacenar, aplicar, crear, adquirir
Mc Elroy	aprender, crear, adquirir, validar, aplicar
Cepeda	adquirir, transferir, aplicar
Paschek y otros	crear, adquirir, refinar, compartir, almacenar, transferir, aplicar
Zouari y otros	SECI, transferir, aplicar
Cordova	SECI
Raudeliūnienė y Kordab	crear, adquirir, almacenar, compartir, aplicar
Todericiu y Boanta	crear, adquirir, almacenar, aplicar
Almujally y Joy	crear, adquirir, almacenar, compartir, aplicar

Los términos normalizados son presentados en la Figura 4 en una nube de palabras. Una nube de palabras suele presentarse a modo de figura abstracta, *en las que son representadas de un mayor tamaño aquellas palabras que aparecen con más frecuencia o son más importantes, (...) tiene como principal función dar a conocer los términos más empleados (y) es muy útil para relacionar* [57].



Figura 4. Nube de normalización terminológica

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir del análisis de los modelos, cuyas fases resultantes se encuentran en la Figura 4, se pueden hallar diversas fases fundamentales (Figura 5), las cuales se detallan a continuación.

- Adquisición del conocimiento externo, a partir de una necesidad detectada (identificación) o a partir de acciones proactivas para la incorporación de nuevo conocimiento mediante vigilancia de fuentes externas.
- Creación de conocimiento mediante mecanismos de transferencia de conocimiento.
- Identificación de necesidades de creación o adquisición de conocimiento.
- Almacenamiento de información y conocimiento en medios técnicos.
- Compartición de conocimiento en los términos de Wiig y su noción de *pooling* como el uso de KMS para posibilitar la efectiva transferencia de conocimiento.
- Aplicación efectiva del conocimiento en las actividades y procesos organizacionales.
- Refinamiento del conocimiento, donde la información almacenada es indexada, se crean los metadatos en término de conceptos del dominio, relaciones y eventos, se realiza minería de datos, técnicas de análisis de datos para el descubrimiento de patrones, detectar *outliers* y asociar metadatos con descriptores de los objetos, buscando un proceso más eficiente de almacenamiento y posterior uso del conocimiento.
- Validación o evaluación del conocimiento para una toma de decisión consciente sobre si se integrará o no en la memoria organizacional. Se enfoca sobre los procesos para identificar el contenido del conocimiento que es de valor para la organización.

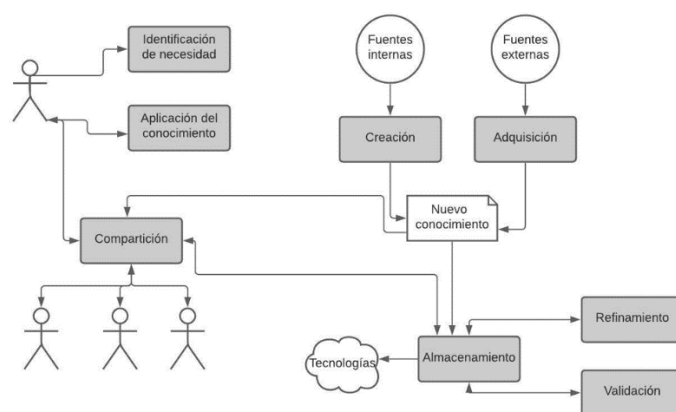


Figura 5. Fases fundamentales para una metodología de gestión del conocimiento

Las actividades de aprender y de transferir se entiende que ya se encuentran representadas entre las fases de creación, adquisición y compartición.

Respecto de las actividades asociadas a SECI, la socialización y la internalización implican la transferencia de conocimiento y el aprendizaje por parte del agente receptor. La transferencia de conocimiento es definida por Kumar y Ganesh [58] como las actividades de intercambio explícito o conocimiento tácito entre dos agentes. El modelo de Nonaka y Takeuchi no refiere solamente al mero intercambio sino también a lo que Vigotsky [59] define como *la reconstrucción interna de una operación externa, produciéndose, entre otras cosas, la transformación de lo interpersonal en intrapersonal y por medio de la internalización, los materiales creados por la cultura dejan de ser externos y ajenos a la persona* [60].

La externalización implica el almacenamiento del conocimiento en algún dispositivo físico, siendo similar a la noción de *holding* de Wiig: *storing the information in specific and easily retrievable physical format...* Wiig también considera como *holding* a la transferencia de conocimiento basada en socialización, al agregar en la definición anterior *... and in people through training*. También estos términos presentan alcance similar que la noción de *almacenar* del CEN.

Por lo tanto, las actividades de transferencia del conocimiento propuestas por Nonaka y Takeuchi implican la transferencia propiamente dicha, el aprendizaje (y reconstrucción interna) y el almacenamiento del conocimiento, similar al *buildy holding and storage* propuesto por Wiig.

6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de modelos de gestión del conocimiento tradicionales se realiza una comparación entre ellos buscando similitudes y aportaciones diferenciales e identificando fases requeridas para toda metodología de gestión del conocimiento. La presentación y análisis de modelos más recientes hallados en ACM, DOAJ, IEEE y Science Direct no arroja resultados más allá de los provistos en los modelos tradicionales.

Tras el análisis y el proceso de normalización terminológica se hallan las siguientes fases: identificación, creación, adquisición, compartición, aplicación, refinamiento y validación. Estas fases pueden ser consideradas en cualquier metodología de gestión del conocimiento.

En futuros trabajos, se estudiará y analizarán modelos hallados en nuevas búsquedas bibliográficas, previéndose una revisión sistemática de la literatura latinoamericana y anglosajona, en la búsqueda de nuevos aportes a las fases presentadas en este trabajo. Además, se prevé avanzar en identificar más detalle sobre cada una de las fases propuestas.

REFERENCIAS

- [1] C. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *The Bell System Technical Journal*, 37, 1948.
- [2] C. Shannon and W. Weaver, *The mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, 1949.
- [3] C. Timpson, *Quantum Information Theory and the Foundations of Quantum Mechanics*. PhD diss., University of Oxford, 2004.
- [4] C. Timpson, "The Grammar of Teleportation." *The British Journal for the Philosophy of Science*, 57, pp. 587-621, 2006.
- [5] C. Timpson, "Philosophical Aspects of Quantum Information Theory.", in Dean Rickles (ed.), *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics*. Aldershot: Ashgate Publishing, 2008, pp. 197-261.
- [6] C. Timpson. *Quantum Information Theory and the Foundations of Quantum Mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [7] R. Ackoff, "From data to wisdom". *Journal of Applied Systems Analysis*. 3(9), 1989.
- [8] M. Díaz, and J. Millán, *Gestión del Conocimiento y Capital Intelectual, a través de modelos universitarios*. Económicas CUC, 2013.
- [9] M. Rueda Martínez, *La gestión del conocimiento y la ciencia de la información: Relaciones disciplinares y profesionales*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Getafe, 2014.
- [10] E. Bueno, *Dirección del Conocimiento y Aprendizaje: Creación, distribución y mediación de Intangibles*, 2000.
- [11] V. Pérez, and F. Urbáez. *Modelos teóricos de gestión del conocimiento: descriptores, conceptualizaciones y enfoques*. Entreciencias: diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 2016.
- [12] L. Straccia, C. Ramacciotti and M.F. Pollo-Cattaneo. "Una visión de la tecnología para la Gestión del Conocimiento. Resultados en la literatura latinoamericana", en Serna, Edgar (ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2020, pp. 135-142.
- [13] M. Gomez and M. García, "Factores influyentes de la gestión del conocimiento en el contexto de la investigación universitaria". *Información, cultura y sociedad*, 33, 2015, pp. 156-167.
- [14] M. Barceló, *Hacia una economía del conocimiento*. ESIC Editorial, 2001.
- [15] J. Meneses, T. Jové, J. Puiggalí and R. Fabregat, "Representación del conocimiento de un proceso de co-creación de material educativo". *TecnoLógicas*, 23(47), 2020, pp. 157-169.
- [16] N. Milton, (2014). *The 4 legs on the Knowledge Management table*. [Online] Disponible en <http://www.nickmilton.com/2014/10/the-4-legs-on-knowledge-management-table.html>.
- [17] C. Ibañez, "Sobre el uso de los conceptos de ciclo de vida e historia de vida en ecología y evolución", *Gayana*, 84(2), Concepción, Chile, 2020.
- [18] T. Levitt, "Exploit the Product Life Cycle". *Magazine*, 1965. Recuperado: <https://hbr.org/1965/11/exploit-the-product-life-cycle>
- [19] Merriam Webster. Recuperado: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/life%20cycle>.
- [20] S. McConnell, *Rapid Development*. Microsoft Press, 1996.
- [21] W. Frakes, C. Fox and B. Nejme, *Software Engineering in the UNIX/C Environment*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991
- [22] J. Whitten and L. Bentley, *Análisis de sistemas. Diseño y métodos*. McGraw-Hill Interamericana, México D.F., 2008.
- [23] E. Maida and J. Pacienza, *Metodologías de desarrollo de software*. Tesis de Licenciatura en Sistemas y Computación. Universidad Católica Argentina: Buenos Aires, 2015.
- [24] *Etapas y fases del descubrimiento*. IBM Tivoli Network Manager IP Edition. Recuperado: <https://www.ibm.com/docs/es/networkmanager/4.2.0?topic=process-discovery-stages-phases>

- [25] Definir las fases y etapas del ciclo de vida de un proyecto. Microsoft. Recuperado: <https://support.microsoft.com/es-es/office/definir-las-fases-y-etapas-del-ciclo-de-vida-de-un-proyecto-18e5a97a-f0c9-4e4d-b6be-5de63be18f70>
- [26] R. Lam Diaz, "Metodología para la confección de un proyecto de investigación", *Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia*, 21(2), 2005,
- [27] C. Pérez Hernández, "Normalización terminológica: esfuerzos de estandarización e instituciones normalizadoras", *Estudios de Lingüística del español*, 18, 2002.
- [28] R. Mayoral Asensio. "Necesidades de normalización terminológica en España desde la perspectiva de la traducción", Jornada Europeas de Traducción e Interpretación. Granada, 1988.
- [29] M. Cabré "Una nueva teoría de la terminología: de la denominación a la comunicación", *VI Simposio de RITerm*, La Habana, 1998.
- [30] A. García Meseguer, "¿Es recomendable la normalización terminológica?", *Las palabras del traductor, II Congreso El Español, Lengua de Traducción*, 2004.
- [31] V. Palomar Gonzalez, "La importancia de la normalización terminológica", *Las palabras del traductor: II Congreso El Español, Lengua de Traducción*, 2004.
- [32] A. Maulini, L. Straccia and M.F. Pollo-Cattaneo, "Una aproximación a un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software". En E. Serna (ed), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, Medellín, Colombia, 2018.
- [33] A. Maulini, L. Straccia and M.F. Pollo-Cattaneo. "Un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software". En E. Serna (ed.) *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2019.
- [34] I. Nonaka and H. Takeuchi. *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford university press, 1995.
- [35] K. Wiig, *Knowledge Management Foundations: Thinking about thinking - How people and organizations create, represent, and use knowledge*. Arlington, TX: Schema. 1993.
- [36] K. Sveiby, "A knowledge-based theory of the firm to guide in strategy formulation". *Journal of intellectual capital*, 2(4), 2001, pp. 344-358.
- [37] M. Earl, "Knowledge management strategies: Toward a taxonomy", *Journal of Management Information Systems*, 18(1), 2001, pp. 215-233.
- [38] M. McElroy, "The new knowledge management: complexity, learning and sustainable innovation", Butterworth-Heinemann, Boston, 2003.
- [39] L. Kerschberg (2001, September). "Knowledge management in heterogeneous data warehouse environments", *International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery*, Springer Berlin Heidelberg
- [40] C., Bustelo Ruesta and R. Amarilla Iglesias. "Gestión del conocimiento y gestión de la información". *Inforárea* 2001; 8 (34): 226-230
- [41] CEN CWA 14924 European Guide to good Practice in Knowledge Management - Part 1 to 5, Brussels, 2004.
- [42] N. Pons, Y. Pérez, E. Stiven, and L. Quintero, "Diseño de un modelo de Gestión del Conocimiento para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos", *Revista Española de Documentación Científica*, 37(2), 2004.
- [43] M. Shongwe, "An Analysis of Knowledge Management Lifecycle Frameworks: Towards a Unified Framework", *The Electronic Journal of Knowledge Management*, 14(3), 2016, pp140-153.
- [44] I. Cepeda-Carrion, S. Martelo-Landroguez, A. Leal-Rodriguez, A. and A. Leal-Millán, "Critical processes of knowledge management: An approach toward the creation of customer value", *European Research on Management and Business Economics*, 23(1), 2017, pp. 1-7.
- [45] M. Zouari and S. Daklhi, "A Multi-Faceted Analysis of Knowledge Management Systems", *Procedia Computer Science*, 138(208), 2018, pp. 646-654.
- [46] F. Cordova and F. Gutierrez, "Knowledge Management System in Service Companies", *Procedia Computer Science*, 139, 2018, pp. 392-400.
- [47] D. Paschek, L. Ivascu and A. Draghici, "Knowledge Management – The Foundation for a Successful Business Process Management", *En Procedia – Social and Behavioral Science*, 238, 2018, pp. 182-191.
- [48] J. Bongku and Y. Kurniawan. "Designing the Knowledge Management System: A Case Study Approach in IT Consultant Company", *Proceedings of the 3rd International Conference on Graphics and Signal Processing (ICGSP 19)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019, pp. 48-52.
- [49] J. Raudeliūnienė and M. Kordab, "Impact of knowledge-oriented leadership on knowledge management processes in the Middle Eastern audit and consulting companies", *Business, Management and Education*, 17(2), 2019, pp. 248-268.
- [50] R. Todericiu and A. Boanta, "Knowledge Retention Within Small and Medium-Sized Enterprises", *Studies in Business and Economics*, 14(3), 2019.
- [51] N. Almujaally and M. Joy, "A Framework for Improving the Sharing of Teaching Practices Through Web 2.0 Technology for Academic Instructors", *5th International Conference on Information Management (ICIM)*, Cambridge, United Kingdom, 2019, pp. 124-129.

- [52] J. Wan, H. Zhang, D. Wan and D. Huang, "Research on knowledge creation in software requirement development", *Journal of Software Engineering & Applications*, 3(5), 2010, pp. 487-494
- [53] A. Frost (2010), 'Knowledge creation', [online], <http://www.knowledge-management-tools.net/knowledge-creation.html>.
- [54] M. Evans, K. Dalkir and C. Bidian, "A holistic view of the knowledge lifecycle : the knowledge cycle (KMC) model", in Ken Grant and John Dumay (eds), *Leading issues in knowledge management: for researchers, teachers, and students*, Vol 2, Reading: Academic Conferences, and Publishing International Limited., 2015.
- [55] UNE 166000:2006. Gestión de la I+D+i: Terminología y definiciones de las actividades de I+D+i. Asociación Española de Normalización.
- [56] H. Mohajan, "A Comprehensive Analysis of Knowledge Management Cycles", *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 4(4), 2016, pp. 184-200.
- [57] Chavez Ortiz, David; Zabala Acosta, Isabella, Tendencias y dinámicas en los mercados de capitales en Colombia: una aplicación mediante wordclouds. Universidad ICESI, Santiago de Cali, 2019.
- [58] J. Kumar and L. Ganesh, "Research on knowledge transfer in organizations: a morphology", *Journal of Knowledge Management*, 13(4): 2009, pp. 161-174.
- [59] L. Vigotsky, Internalización de las funciones psicológicas superiores. En L. Vigotsky (Ed.), *El desarrollo de los procesos psíquicos superiores*, Barcelona: Editorial Crítica, pp. 92-133.
- [60] E. Ruiz Carrillo; E. Rivera. "Luis Vigotsky: la escuela y la subjetividad". *Pensamiento Psicológico*, 8(15). Pontificia Universidad Javeriana. Cali, Colombia, 2010, pp. 135-145.

Diseño de un modelo de indicadores para cuantificar los valores CERT de la cultura BPM desde la perspectiva de eficiencia y eficacia. Parte 3

Claudia Yadira Rodríguez Ríos¹

Cristian Alejandro Quintero Bocanegra²

Cristian Camilo Quinto Torres³

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

La cultura organizacional está representada por los valores, así mismo, la cultura BPM también se representa por los valores Customer orientation, Excellence, Responsibility, Teamwork CERT. Un inconveniente de los valores es que son intangibles y en su mayoría no son fácilmente cuantificables, por lo que la alta gerencia no tiene una percepción concreta sobre su importancia y valor. Es así que la presente investigación trata de subsanar esta situación, al diseñar un modelo de indicadores que permita la valoración cuantitativa de los mismos, y la vincule a la eficiencia y efectividad de los procesos de la organización. Este trabajo de investigación parte de otro estudio en el que se definieron y determinaron los valores CERT, así como sus sub-dimensiones. Para orientación al cliente, se tiene el análisis para cliente interno y externo; las sub-dimensiones de Excelencia son innovación y mejoramiento continuo; para Responsabilidad rendición de cuentas y compromiso; y para Trabajo en Equipo se tienen los equipos formales e informales. El aporte realizado en el estudio consiste en diseñar indicadores apropiados que permitan medir el desempeño de estos valores en la organización; adicionalmente, estos indicadores también se asocian a la efectividad o la eficacia de los procesos. El modelo pretende ser una herramienta que le facilite a la gerencia la medición de estos indicadores, y hacer un diagnóstico de la situación actual sobre los valores CERT, indicando un nivel de madurez de la cultura BPM, y a su vez establecer un camino a seguir para mejorarlos y, por ende, mejorar la eficiencia y la eficacia de la organización, con el fin de presentar a las directivas la importancia y los efectos que tienen la cultura BPM en la organización.

¹ Contacto: claudia.rodriguez@escuelaing.edu.co

² Contacto: cristian.quintero-b@mail.escuelaing.edu.co

³ Contacto: cristian.quinto@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Hoy día, las organizaciones buscan realizar actividades orientadas hacia la calidad y mejora de productos y servicios con el fin de establecer una fidelidad de los clientes, para lograr un crecimiento constante en el mercado en base a la competitividad; por esto, las empresas implementan nuevas metodologías y tendencias, como son: los sistemas de gestión de mejora de las tecnologías, procesos de reingeniería, Six sigma, Lean manufacturing, SCM, entre otros; presentando en su ejecución mejoras en la eficiencia y eficacia empresarial, a su vez desatendiendo la influencia de la cultura organizacional dentro del equilibrio corporativo.

Diferentes investigaciones demuestran la importancia de potenciar el valor de los activos intangibles, principalmente la cultura organizacional que establece ventajas en las competencias organizacionales, ahora bien, la mayoría de los artículos se enfocan en un análisis netamente cualitativo, empleando, por ejemplo, técnicas que identifican la percepción de los empleados sobre el compromiso de la alta dirección, la necesidad de compartir conocimiento y la gestión del conocimiento [1]. Es allí, donde se busca establecer un modelo que consiga cuantificar estos análisis cualitativos.

En el comienzo de esta investigación se planteó la siguiente pregunta: ¿Cómo poder cuantificar los valores de Excelencia y Responsabilidad ER, bajo las perspectivas de Eficiencia y Eficacia? Para esto se desarrolló una búsqueda de información en artículos científicos, los cuales orientaron la investigación con una rigurosa descripción contextual de los temas que se deberían tratar [2, 3], así mismo, se estudiaron bases de datos científicas, tales como JSTOR, EBSCO, Emerald, ScienceDirect, y ProQuest.

2. MARCO CONCEPTUAL

Se entiende por Business Process Management BPM como el enfoque que se encarga de mejorar el rendimiento de los procesos, tanto en su diseño como en su ejecución mediante el uso de métodos, tecnologías y herramientas, con el fin de optimizar los procesos para que estos sean efectivos, ágiles y transparentes, este se ejecuta mediante el trabajo en conjunto de personas de negocio y tecnólogos que recolectan información y la emplean para una ejecución y gestión adecuada de los procesos en la organización [4].

Enfocar la organización dentro de la cultura BPM brinda la posibilidad de estandarizar, controlar y automatizar los procesos, ofreciendo una mayor competitividad a la empresa mediante el uso de herramientas que innovan las actividades laborales causando un impacto en el mercado [5]. Zairi define, Business process management como *el enfoque estructurado para analizar y mejorar continuamente actividades fundamentales tales como fabricación, mercadeo, comunicaciones y otros elementos principales de las operaciones de una compañía* [6]. De igual manera, BPM permite, a partir de la aplicación de métodos y herramientas, aumentar la rentabilidad en la organización y obtener ciertos beneficios [7, 8]:

- Mejora de la velocidad de realización de los procesos de negocio. La implementación del modelo BPM permite aumentar la velocidad en la ejecución de los procesos de negocio mediante la disminución de tiempos en las operaciones, automatización de tareas y ejecución de operaciones en paralelo.
- Incremento de la satisfacción del cliente. Un aumento en la velocidad de los procesos y una entrega de los productos o prestación de servicios al cliente de manera más rápida implica un aumento en la satisfacción de los clientes externos; quienes optarán en un futuro volver a requerir los servicios brindados por la compañía y un aumento en la satisfacción de los clientes internos quienes obtendrán los datos, informes o reportes de manera más rápida y organizada.
- Responsabilidad e integridad. El enfoque BPM garantiza el cumplimiento de los reglamentos, normatividad y los altos estándares de prestación de servicios y calidad en productos ofrecidos por la compañía.
- Optimización y eliminación de tareas innecesarias. El análisis detallado y seguimiento continuo de las operaciones y procesos realizado por el modelo BPM permite identificar tareas que no generan valor agregado al producto o servicio y el trabajo innecesario durante la operación, lo que implica la

eliminación de estos y conlleva la optimización de los procesos; facilitando su seguimiento, control y gestión de manera continua y rápida.

- Inclusión de clientes y socios de mercado en los procesos de negocio. Mediante la implementación del enfoque BPM se garantiza una mayor participación de los clientes externos e internos en los procesos, lo cual permite un análisis de proceso más riguroso identificando las posibles falencias que el cliente en su experiencia puede determinar y permite una aplicación de soluciones más acertada.
- Agilidad organizacional. BPM proporciona las herramientas necesarias para la obtención de los objetivos estratégicos de una compañía y obtención de mejores resultados de una manera más rápida y ágil gracias al mejoramiento continuo y progresivo de sus procesos.

Además, Business Process Management permite a las empresas mejorar continuamente en las actividades que desarrollan, destacándose en operaciones de mayor relevancia, y generan un alto impacto en las utilidades que proporciona valor añadido a las organizaciones [6]. Durante de este enfoque se encuentra un conjunto de reglas fundamentales para su práctica óptima en los procesos de la organización:

- Se debe llevar un control de las actividades realizadas donde se evidencie su estado actual, con el fin de garantizar el cumplimiento de objetivos y la capacidad de brindar productos de alta calidad.
- Es necesario realizar un seguimiento a los individuos mediante la evaluación del desempeño, respecto a las metas cumplidas, con el fin de tener control de los procesos que se pueden mejorar posteriormente.
- El modelo BPM debe ser capaz de garantizar una mejora continua y adaptabilidad al cambio.
- Durante la ejecución del modelo BPM se deben presentar estrategias o métodos que garanticen una aplicación adecuada del modelo, con el fin de adquirir competitividad en el mercado [6, 9].

2.1 Cultura Organizacional

La cultura organizacional es el conjunto de creencias, los valores, los lenguajes, los códigos verbales y no verbales, los reglamentos, las normas, las políticas y los procedimientos que inspiran el comportamiento de los empleados, lo cual genera experiencias comunes, así como el estilo de liderazgo de la alta gerencia, que identifican y cohesionan a los grupos de personas que conforman la organización [10].

En resumen, la cultura organizacional, se define alrededor de los valores (como el conjunto de normas establecidas en nuestra mente, que son la guía que nos ayuda a actuar de manera responsable frente a diversas situaciones), las creencias (es la certeza que un individuo tiene acerca de una determinada cuestión), la toma de decisiones (como la acción básica de escoger entre las alternativas planteadas), la comunicación efectiva (que asegura la comprensión del mensaje mediante la realimentación) y el trabajo en equipo (se realiza por varios individuos con un objetivo común) [9, 11].

2.1.1 Eficiencia y Eficacia

Si bien la eficiencia y la eficacia son dos conceptos diferentes, están estrechamente relacionados cuando se considera el desempeño de una organización, el cual debe combinar ambos aspectos [12]. Se observa que, la eficiencia mide el grado en el que una organización utiliza sus recursos de manera óptima y productiva para proporcionar sus servicios, es la relación entre las entradas y salidas de los procesos de negocio desde el punto de vista interno de la compañía [13].

Ahora bien, la eficacia mide el grado en que la organización desarrolla sus actividades de manera correcta, de acuerdo con lo planeado para lograr sus objetivos; es considerada un aspecto externo y se resume como *que tan bien la compañía logra los requerimientos y expectativas desde el punto de vista del cliente* [11, 14], además, esta indica en qué medida nos acercamos a la imagen objetivo o visión institucional. Es decir, la eficacia se centra en los resultados y la eficiencia en el cómo se logran los resultados.

Por su parte, la efectividad es el resultado del trabajo conjunto entre la eficiencia y la eficacia, el cual se encarga de medir el grado en que se alcanzan los logros y objetivos organizacionales de la compañía, por medio del desarrollo adecuado de métodos y tareas que permitan su elaboración [15].

2.1.2 Cultura BPM

La cultura BPM se enfoca principalmente en los denominados valores CERT, representados a través de la orientación al cliente, la excelencia, la responsabilidad y trabajo en equipo. Estos principios intangibles se encargan de definir los comportamientos sociales en la organización donde la buena ejecución de estos en una organización permite una interacción favorable entre proceso y persona asegurando el desarrollo, crecimiento, evaluación y mejora de los procesos de manera continua [8, 11, 16].

- *Orientación al cliente.* Se refiere a la actitud proactiva y receptiva hacia las necesidades del proceso [17]. Se entiende a los clientes como el motor y objetivo de los procesos comerciales, en donde la empresa debe buscar en todo momento el cumplimiento de los requerimientos y necesidades del cliente, brindando altos estándares en la prestación de servicios y la entrega de productos. Es decir, el cliente se considera como un factor externo causante del cambio en la perspectiva de la organización, buscando el cumplimiento de sus requerimientos y necesidades. La orientación al cliente se entiende como el conductor, hacia los objetivos de los procesos de negocio, garantizando que los requisitos de éste se cumplan de manera efectiva [11].
- *Excelencia.* Se entiende por excelencia como el método para garantizar altos estándares en los procesos, productos y servicios mediante la innovación continua y la mejora progresiva [18, 19]. Los métodos implementados deben ser capaces de adaptarse al cambio, por lo cual conviene ser versátiles y flexibles para garantizar el cumplimiento de su adecuada ejecución. Esta se orienta hacia el mejoramiento continuo, enfocado en la revisión constante de las condiciones y procesos existentes de la organización, que impulsa la innovación y elimina posibles deficiencias, con el fin de mejorar el desempeño de los procesos [11].

Con lo anterior, la excelencia es parte fundamental del BPM y su cultura, la cual pretende mejorar la eficiencia y la eficacia de los procesos de las organizaciones a través del mejoramiento continuo y la innovación.

- *Responsabilidad.* Se refiere a la actitud positiva del trabajador hacia sus obligaciones con la empresa, además, el asumir las consecuencias de sus decisiones, su compromiso interno y el deber, teniendo en cuenta la voluntad que posee para el logro de los objetivos de la organización [11]. La responsabilidad empresarial puede verse desde dos puntos de vista, el compromiso y el desempeño. El compromiso hace referencia a la motivación de los miembros de la compañía jugando así un rol activo en el cumplimiento de los objetivos del BPM.

El desempeño comprende actividades que aseguran que los objetivos de la empresa se cumplan consistentemente de una manera eficaz y organizacional [11, 20]. Se destacan tres características principales las cuales son:

- Búsqueda de la alineación de los objetivos personales con los organizacionales con el fin de fortalecer la relación entre la persona y la organización mediante el conjunto de valores y creencias.
- Promover un sentido de pertenencia del trabajador con la organización, de tal manera, que este ejecute sus labores con un alto esfuerzo y dedicación, obteniendo buenos resultados y que, a su vez, priorice su trabajo por encima de otros compromisos.
- La ejecución de las tareas de manera responsable por parte del trabajador fomenta la permanencia y el deseo de continuar en la organización, de allí, la búsqueda de resultados que generen impactos positivos [8], [16].
- *Trabajo en equipo.* Según [21], el trabajo en equipo *se refiere a la actitud positiva hacia la colaboración multifuncional.* Este tiene como fin cumplir metas u objetivos organizacionales y personales mediante la colaboración mutua dentro de la empresa, además, permite el cumplimiento de valores como lo son la excelencia, orientación al cliente y la responsabilidad [19, 21]. Para ello, se requiere mantener una comunicación clara entre los participantes que permita mayor colaboración entre áreas y cargos.

3. MÉTODO

Inicialmente, se hizo una búsqueda sistemática de información en artículos científicos relacionados con la cultura de Business Process Management, los cuales orientaron la investigación con una rigurosa descripción contextual de los temas que se deberían tratar. Inmediatamente después, se distinguieron los artículos de interés para identificar, diferenciar y escoger el material, en función de los criterios teóricos que se venían desarrollando dentro la investigación, para así determinar los conceptos claves que permitan establecer que aspectos favorecen la cultura de BPM en un equipo de trabajo [2], [3]. Además, se consultaron bases de datos científicas, tales como ScienceDirect, JSTOR, Emerald, E-books7-24, EBSCO, ProQuest y SciELO.

4. ESTRUCTURA DEL MODELO

En Figura 1 se observa la caracterización planteada para la creación y desarrollo del presente modelo, mediante un enfoque de cultura BPM, que nos permite identificar y cuantificar los valores CERT. Para este análisis se emplearon los valores de Excelencia, Responsabilidad, Cliente y Trabajo en equipo, con el objetivo de determinar el impacto que podrían llegar a tener en la estructura organizacional de la compañía, estos serán medidos a partir del uso de indicadores que califican la eficiencia y eficacia que tiene la organización frente de los criterios de evaluación.

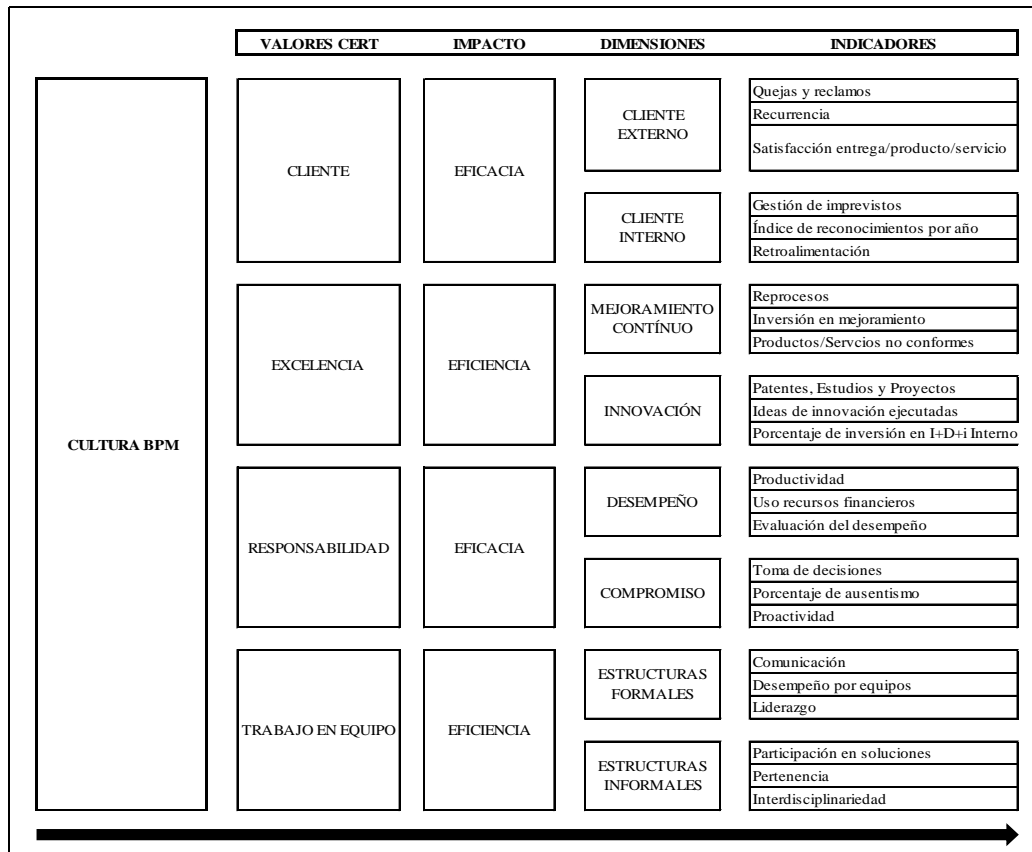


Figura 1. Modelo propuesto para los indicadores evaluados, Fuente: elaboración propia

Los indicadores propuestos para los valores CERT para cada uno de los criterios se describen a continuación.

4.1 Indicadores de Orientación al Cliente

4.1.1 Cliente externo

- *Quejas y reclamos.* Con la ecuación (1) se calcula los errores que se generan en la prestación de un servicio son factores determinantes para mejorar y detectar fallas que se producen y las cuales pueden generar resultados diferentes a los esperados; la satisfacción del cliente se incrementa adoptando una

cultura de satisfacción del cliente basada en la escucha para atender todas las solicitudes y en la respuesta para comunicarlas, Es por esto por lo que se toma la iniciativa de evaluar un indicador de quejas y reclamos con el fin de mantener el control de las organizaciones para conservar el direccionamiento de sus procesos enfocados al cliente [22].

$$\frac{\# \text{ Quejas y reclamos}}{\text{Total de registros al mes}} \quad (1)$$

- *Recurrencia.* En ecuación (2) se plantea cómo la fidelidad que tienen los clientes con la organización es un indicador de que los procesos realizados cumplen con las expectativas requeridas para el servicio, se reconoce el esfuerzo en la resolución de los problemas y no se tiene la necesidad de buscar otro proveedor, por lo que es imperativo realizar un registro de los clientes que se mantienen en la compañía como indicador de que el proceso se está haciendo de forma correcta [23].

$$\frac{\# \text{ Servicios ofrecidos de venta cruzada recurrentes al trimestre}}{\text{Total del clientes al año}} \quad (2)$$

- *Satisfacción entrega y calidad de producto/servicio.* En ecuación (3) se destaca al cliente como un eje fundamental para la organización, es por eso por lo que se debe establecer un esfuerzo continuado para captar y fidelizar una relación con él, a largo plazo. Para mantener esta relación con el cliente es necesario ir evaluando continuamente su satisfacción y cambiando según las necesidades de este. Debe señalarse que no es suficiente entregar productos o servicios solamente como organización si no se debe prestar interés por establecer y fortalecer relaciones con los clientes externos y de este modo garantizar su permanencia en el mercado [24].

$$\frac{\# \text{ Fecha planeada de facturación} - \text{fecha real de facturación}}{\text{Fecha planeada de la facturación}} \quad (3)$$

4.1.2 Cliente interno

- *Gestión de imprevistos.* La capacidad de reacción a las peticiones de los clientes internos es un indicador de coordinación y de desarrollo de las capacidades internas que garantizan la realización de los procesos de forma oportuna enfocados a la satisfacción de las necesidades del cliente. Por tal motivo se plantea el indicador ecuación (4), con el fin de evaluar la gestión y solución de los imprevistos en las organizaciones [25].

$$\frac{\# \text{ Imprevistos solucionados al mes}}{\# \text{ Total de imprevistos al mes}} \quad (4)$$

- *Índice de reconocimientos por año.* Se reconoce como motivación al proceso psicológico que causa estimulación, dirección y persistencia a la hora de lograr un objetivo, y se resalta la motivación como la intensidad, dirección y persistencia del esfuerzo de un individuo para conseguir una meta en un proceso determinado, siendo fundamental tres elementos; intensidad, esfuerzo y persistencia. La intensidad consiste en la medida de esfuerzo que la persona utiliza para lograr su objetivo. Este esfuerzo deberá canalizarse en la dirección de la meta deseada. La persistencia se refiere al tiempo que una persona sostiene dicho esfuerzo [26].

Ahora bien, la teoría de jerarquía de las necesidades desarrollada por Maslow, resalta la importancia de la motivación de las personas como eje fundamental, para la obtención de una mayor productividad por parte de los funcionarios de la organización. Donde sobresale la necesidades de estima la cual nos habla de que todas las personas tienen la necesidad de una valoración normalmente alta hacia sí mismos, auto-respeto y de la estima de los demás, estas son las necesidades del ego y de sentirse reconocido dentro del grupo de pertenencia [27]. A continuación, se plantea ecuación (5) como indicador.

$$\frac{\# \text{ De reconocimientos logrados por trimestre}}{\text{Total de reconocimientos alcanzados en la empresa por Trimestre}} \quad (5)$$

- *Retroalimentación.* En ecuación (6), la participación de los empleados en la retroalimentación de los procesos y de la satisfacción de los clientes internos, promueve una mejor comunicación entre las áreas

comprometidas en los procesos, evitando malas interpretaciones y permitiendo un desarrollo favorable de las actividades organizacionales. Este indicador tiene gran relevancia, ya que evita posibles errores que se derivan de una mala comunicación entre las áreas de las organizaciones [25].

$$\frac{\# \text{ De participaciones por área en la mejora de procesos}}{\text{Total de participaciones en la mejora de procesos}} \quad (6)$$

4.2 Indicadores de Excelencia

4.2.1 Mejoramiento continuo

- *Reprocesos.* En ecuación (7), se demuestra que uno de los factores que tienen mayor incidencia en el aumento innecesario de los costos de las organizaciones son los reprocesos que, en ocasiones, para la gerencia pasan inadvertidos. Es por esta razón que se plantea este indicador, el cual genera alertas sobre los procesos ejecutados en la empresa en búsqueda del mejoramiento continuo [11].

$$\frac{(\# \text{Reprocesos en el periodo } n-1) - (\# \text{Reprocesos en el periodo } n)}{\text{Total de reprocesos hasta el periodo } n} \quad (7)$$

- *Inversión en mejoramiento.* Las empresas, por lo general, cuentan con un modelo de inversión el cual determina las asignaciones destinadas para los mejoramientos de la organización [28]. El principal fin de la inversión es poder mejorar estos procesos mediante la capacitación de personal, contratación de personal, mejoramiento de la calidad, implementación de tecnologías, reducción de tiempos y actividades innecesarias entre otras, en el indicador ecuación (8), favorece, que de manera permanente la organización invierta en los mejoramientos identificando la inversión total para el mejoramiento de procesos en periodos consecutivos.

$$\frac{\# \text{ De ideas de mejoramiento ejecutadas por mes}}{\text{Ideas de mejoramiento propuesto por mes}} \quad (8)$$

- *Productos/servicios no conformes.* Históricamente la calidad de un producto/servicio se centra en producir bienes dentro de un rango de valores concretos, es decir que sus características de calidad estuvieran entre tales valores. De este modo las no conformidades también se detectan por los clientes dando lugar a quejas y reclamaciones, convirtiéndose en devoluciones del producto, lo que genera reprocesos, pérdida de clientes y/o daños al prestigio de la organización. Por lo tanto, es vital garantizar las características de calidad deseadas en los productos/servicios ofrecidos al consumidor [29]; los autores consideran que estos errores o fallas, son oportunidades para identificar aspectos a mejorar en los procesos. Por lo anterior, se plantea ecuación (9) como indicador.

$$\frac{\# \text{ De inconformidades por mes}}{\text{Total de inconformidades por mes}} \quad (9)$$

4.2.2 Innovación

- *Patentes, estudios y proyectos.* La innovación es la creación y ejecución de una idea con la finalidad de conseguir beneficio económico de esta, así lo plantea el manual de Frascati, donde sostiene que la innovación es la transformación de una idea en un producto nuevo o mejorado puesto en el mercado, lo anterior se puede complementar con la definición de la innovación tecnológica la cual se define como la generación de nuevos productos y nuevos procesos al interior de la empresa y en su entorno inmediato [30].

Los mercados de innovación tecnológica se representa por la invención de un nuevo producto, esta invención se patenta con el fin de obtener exclusividad de explotar el invento en el mercado, por ello se plantea el indicador intensidad de patentes cuyo objetivo es identificar el rendimiento en innovación tecnológica la organización respecto al mercado [31], ahora bien, como las Pymes no sacan patentes se crea un indicador alternativo en caso de que la empresa sea una de ellas. Es por esto, que se sugiere el desarrollo de los siguientes indicadores con ecuación (10) y ecuación (11).

$$\frac{\# \text{ Patentes autorizadas por año}}{\# \text{ Total de empleados por año}} \quad (10)$$

$$\frac{\# \text{ Estudios y proyectos autorizados por año}}{\# \text{ Total de estudios y proyectos presentados por año}} \quad (11)$$

- *Ideas ejecutadas.* En ecuación (12), hace referencia a la innovación, esta se define como toda actividad dirigida a la generación, por un lado, y a la aplicación, por otro, de nuevos conocimientos, donde la creación de la idea es, cuando los funcionarios de la empresa plantean nuevas formas o maneras no concebidas de hacer algo en los procesos, un nuevo conocimiento, y luego la empresa puede implementar estas ideas en la operación lo cual se denominada explotación, que incluye en el desarrollo comercial, la aplicación y transferencia de conocimientos y resultados; lleva a la plena valoración y utilización de una invención [32].

$$\frac{\# \text{ De ideas innovadoras realizadas(Periodo n)}}{\text{Total de ideas innovadoras propuestas(Periodo n)}} \quad (12)$$

- *Porcentaje de inversión en I+D+i interno.* El I+D+i interno, indica si en la empresa existe un área de investigación, desarrollo e innovación o algo similar, donde se realicen estos roles. La idea de este indicador ecuación (13) es presentar la importancia para la alta gerencia, el invertir dinero en estos rubros. Estas financiaciones pueden darse con recursos propios y/o externos, como ocurre, en el caso de préstamos para I+D+i subvencionados por el Estado [30].

$$\frac{\text{Inversión para I+D+i anual}}{\text{Presupuesto de la empresa anual}} \quad (13)$$

4.3 Indicadores de Responsabilidad

4.3.1 Desempeño

- *Productividad.* Según la ingeniería, la productividad laboral se concibe como el impacto del sistema productivo que se desarrolla por el desempeño de las personas en su sitio de trabajo, a su vez está relacionado con la optimización de los recursos tanto financieros, materiales y tecnológicos en la empresa [33]. Para las organizaciones, a mayor eficiencia en la transformación de los recursos en productos y servicios, se logra ser más productivo y dar un mayor valor agregado al bien, la productividad es el cociente entre producción/output (bienes y servicios) y los factores productivos inputs (trabajo, capital y producción) [34]. Con base a lo anterior, se propone ecuación (14) como indicador.

$$\frac{\# \text{ Compromisos realizados por proyecto}}{\text{Compromisos planeados por proyecto}} \quad (14)$$

- *Uso recursos financieros.* En ecuación (15), se mide como el buen desempeño de la organización no solo se ve reflejado en el cumplimiento de los objetivos propuestos, sino también en la optimización de los recursos financieros, esto nos indica que la empresa está siendo eficiente [35]. Por cada objetivo o meta que tenga la empresa se le debe asignar un recurso financiero el cual debe ser registrado al comienzo y al final del cumplimiento de cada meta cumplida exitosamente para ser analizado de acuerdo con la relación propuesta del indicador [36].

$$\frac{\text{Recursos financieros Utilizados por proyecto}}{\text{Recursos financieros presepuetados por proyecto}} \quad (15)$$

- *Evaluación del desempeño.* Hoy en día es un hecho que las compañías tienen un enorme poder respecto a la vida social de tanto de los clientes como los trabajadores; y también es cierto, que al interior de ellas existen conflictos entre actores que son resueltos por la capacidad que se tenga de satisfacer a los involucrados. La teoría de *stakeholders* reconoce esta realidad de pluralidad de intereses y poderes en la organización como la falta de sintonía de los intereses de la empresa con los intereses de los distintos participantes en su razón social, de otra parte, *stakeholders* se define como cualquier grupo o persona que puede afectar o ser afectado por la organización [37].

Bajo este enfoque ecuación (16), la rendición de cuentas expone las acciones de la empresa en función a los intereses de los distintos protagonistas que tengan mayor participación sobre ella. Es decir, la rendición de cuentas es reputacional, ya que busca darle legitimidad a la empresa frente a los grupos de interés afectados [38].

$$\frac{\# \text{ De evaluaciones realizadas anualmente}}{\text{Total de empleados al año}} \quad (16)$$

4.3.2 Compromiso

- *Toma de decisiones.* La responsabilidad se refiere al compromiso de un empleado hacia los objetivos de la empresa, a la rendición de cuentas por las decisiones que tome en los procesos y a las consecuencias que estas generen [11]. Es importante tener un control respecto al impacto que se genere a partir de la toma de decisiones en áreas específicas de la empresa, por lo tanto, se recomienda analizar un indicador que permita evaluar las decisiones que el empleado de un área determinada realice un periodo de tiempo con respecto al mejoramiento del (los) proceso(s) que estén involucrados. El indicador ecuación (17), deberá medirse periódicamente y en las áreas determinadas por las directivas de la organización.

$$\frac{\# \text{ De soluciones con impacto positivo por periodo } n}{\text{Total de soluciones por periodo } n} \quad (17)$$

- *Porcentaje de ausentismo.* La palabra ausentismo se define como el abandono, lejanía o ausencia de las funciones y deberes por parte del trabajador, incumpliendo sus horarios y entregables establecidos en el contrato de laboral. En cambio, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) denota el ausentismo como la práctica que ejerce un empleado de no asistencia al trabajo por un período tiempo, quedando excluidos los periodos vacacionales, las huelgas, períodos gestacionales y privación de la libertad [39].

De esta manera el ausentismo laboral es un problema inherente al desarrollo del trabajo y requiere de especial atención en las organizaciones, debido a que ocasiona un alto costo para las instituciones, así como efectos negativos en la dinámica de la producción del trabajo [40]. De acuerdo a investigaciones realizadas a nivel mundial esta problemática ha incrementado en un 30% en los últimos 25 años, aumentando los costos empresariales en salubridad, interfiriendo en la productividad y ocasionando desgaste del recurso humano [39]. De manera, que se sugiere ecuación (18) como indicador.

$$\frac{\text{Cantidad de inasistencias por trimestre}}{\text{Total de asistencias establecidas en el contrato por trimestre}} \quad (18)$$

- *Proactividad.* Según [41] la proactividad, se entiende como el grado en el cual las personas emprenden acciones para influir en su entorno. Por otro lado, se postuló que, en ciertas ocasiones, las empresas o compañías emplean comportamientos proactivos con el objetivo de establecer una mejor posición en relación con su competencia [42].

Con lo anterior, se considera una compañía proactiva cuando se sostiene una postura de anticipación y ejecución sobre las posibles necesidades del mercado, en efecto se lograría identificar las necesidades futuras de los clientes para así anticiparse a las tendencias y cambios del sector de interés [42]. Finalmente, ecuación (19) representa el indicador de productividad.

$$\frac{\# \text{ De propuestas que anticipen el mercado por año}}{\text{Total de propuestas presentadas por año}} \quad (19)$$

4.4 Indicadores de Trabajo en equipo

4.4.1 Estructuras Formales

- *Comunicación.* El clima organizacional se denota como la percepción que tienen los involucrados dentro de una organización tanto de su funcionamiento estructural como el dinámico, esta percepción afecta los niveles de satisfacción y motivación en el desempeño y disposición de los empleados, así como su permanencia en la compañía [43].

Dentro de este marco se establece la comunicación como un proceso donde se le da forma a un conjunto de significados en un mensaje hacia un equipo de trabajo, el cual debe ser equivalente a lo que transmitió el emisor (Lucas, 1997). De acuerdo con los resultados de la investigación de [43], se encuentra una correlación significativa entre la comunicación interna y el clima organizacional en los equipos formales de la empresa. Es así, como la comunicación interna es parte fundamental en todo aspecto social ya que destaca el manejo correcto de la información corporativa a todos involucrados de los equipos de trabajo creando una cultura de fidelidad, empoderamiento y sentido de pertenencia. Con lo anterior, se propone ecuación (20) como indicador.

$$\frac{\# \text{ De reuniones formales por área al mes}}{\text{Total de reuniones formales en la empresa al mes}} \quad (20)$$

- *Desempeño por equipos.* Según Stoner (1994), el desempeño por equipos es la forma como los involucrados de la organización trabajan de forma eficaz, para alcanzar metas compartidas, teniendo en cuenta la normatividad de la empresa. Por su parte, Chiavenato (1998) define el desempeño por equipos como una apreciación sistemática del potencial generado por el individuo en el puesto de trabajo, ratificando que toda evaluación es un proceso para resaltar el valor, la excelencia o las cualidades del empleado.

Desde la perspectiva de Harbour (1999), plantea que en el desempeño laboral influyen tres factores conocidos como intervinientes, los cuales son: las características de condiciones, entre las cuales se encuentran sociales (status, roles), culturales (creencias, valores y actitudes) y demográficas (edad, nivel socio-económico, salud y educación), luego están las características interpersonales, que incluyen las tendencias y patrones del comportamiento de los involucrados, y finalmente las características del puesto trabajo las cuales comprenden el entorno externo de la persona [44]. Es por esto, que se presenta ecuación (21) como indicador.

$$\frac{\text{Fecha planeada de entrega del proyecto} - \text{fecha real de entrega del proyecto}}{\text{Fecha planeada de entrega del proyecto}} \quad (21)$$

- *Liderazgo.* Se reconoce como liderazgo la relación entre un individuo y un grupo que afronta cualquier necesidad en una situación, esta relación suele ser funcional y se expone cuando una persona resalta del resto del grupo, para organizar los medios o recursos disponibles y lograr satisfacer las necesidades de la empresa Knickerbocker (1967). Es por esto, que el liderazgo adquiere una importancia relevante hoy en día en las organizaciones, debido a que estas requieren líderes con orientación al logro, pues el liderazgo es la forma más eficaz de revitalizar el funcionamiento de las empresas y llevarlas a hacer competitivas imprimiéndoles vigor y dirección a cada uno de sus empleados [45]. Como indicador se desarrolla ecuación (22).

$$\frac{\# \text{ De decisiones autónomas del equipo de trabajo por mes}}{\text{Totales de decisiones en el área por mes}} \quad (22)$$

4.4.2 Estructuras informales

- *Participación en soluciones.* La organización informal se construye a partir de las relaciones dentro y entre los grupos, y a través del desarrollo de acuerdos informales para el trabajo, resaltando la importancia de la comunicación entre los trabajadores, añadiendo la búsqueda de un interés, beneficio, gustos compartidos y otros factores sociales que llevan al establecimiento de grupos de trabajo. Se logra una conexión entre sus miembros, que ejerce una influencia en la organización formal, así mismo se presentan elementos como la personalidad, los sentimientos y las emociones de los individuos de la organización, que desencadenan la aceptación o exclusión a un grupo [46]; se promueve, entonces, una organización centrada en las personas, bajo el precepto de que estas no trabajan para la organización, sino que son la organización misma [47].

En ecuación (23), se evidencia que la realidad de las organizaciones dentro los equipos informales, pueden llegar a ser claves a la hora de solucionar problemas o situaciones adversas de los procesos o

de la operación en general, dado que los funcionarios interactúan más por intereses personales y otros vínculos que pueden facilitar la colaboración, apoyo y cooperación entre las diferentes áreas para encontrar y agilizar el desarrollo de las acciones.

$$\frac{\# \text{ De problemas solucionados por equipos informales en el periodo } n}{\# \text{ Retos presentados en el periodo } n} \quad (23)$$

- **Pertenencia.** La pertenencia se define como una fuerza que une a una entidad o individuo en torno a una acción [48], las empresas con empleados comprometidos tienen una tasa de éxito de 103 por ciento más alto que las empresas del mismo sector que cuentan con empleados menos compromiso o sentido de pertenencia, por lo anterior, en ecuación (24) se muestra como las empresas desean empleados comprometidos ya que son el motor de éxito de la organización, hay estudios que plantean que a mayores niveles de compromiso por parte de los empleados se reduce los niveles de rotación de los empleados y la intención de abandonar la empresa [49].

$$\frac{\# \text{ Empleados que desean permanecer en la empresa los siguientes 5 años}}{\text{Total de empleados del último año}} \quad (24)$$

- **Interdiscipliniedad.** Los equipos informales destacan la cultura organizacional, las relaciones interpersonales, entre las áreas, los roles y las normas o comportamientos sociales [50], adicionalmente, algunos autores como [51], aseguran que cuando los equipos informales afectan las estructuras formales, surgen fuerzas propias de estas, que tratan de recuperar el estatus quo inicial, esto podría ser similar a la resistencia al cambio natural entre los funcionarios de la organización; ahora bien, la interdiscipliniedad de los equipos informales puede favorecer las interrelaciones entre las actividades realizadas, aportando mejores soluciones a las problemáticas planteadas [52]. A continuación, se plantea ecuación (25) como indicador.

$$\frac{\# \text{ De empleados que participan en un equipo informal de la misma área}}{\text{Total de empleados de un equipo informal}} \quad (25)$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para probar la validez del modelo propuesto, este se aplicó en una empresa pequeña (40 empleados) de tecnología de información la cual desempeña un servicio de soporte e implementación de proyectos para la automatización de procesos de negocio, desarrollos de BPM, innovando e impulsando la transformación digital de las empresas.

La metodología que se llevó a cabo consistió en realizar entrevistas por parte de los autores del modelo con la alta gerencia de la empresa, debido a que, estos poseen el conocimiento y funcionamiento de la organización y asegura una mayor veracidad en la información que se suministra. A continuación, en la Figura 2 se presenta la recopilación de los datos obtenidos en la empresa, separados por cada una de las dimensiones de los valores CERT.

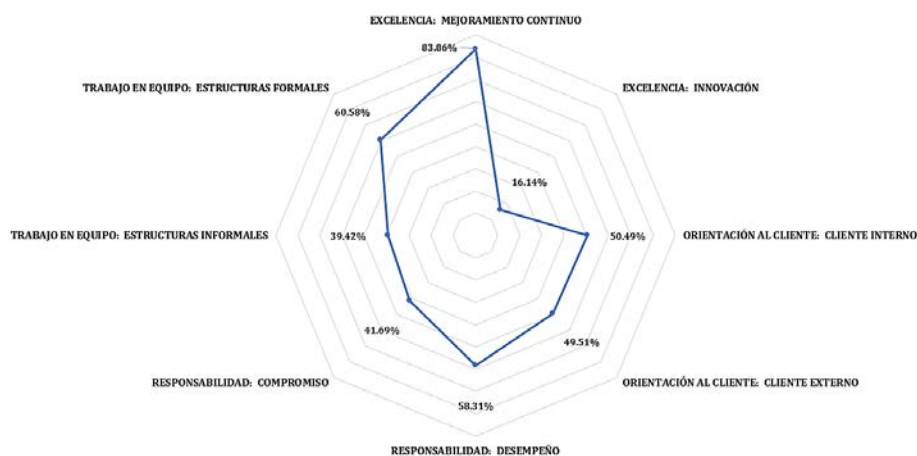


Figura 2. Tabla resumen

Es de anotar que el valor obtenido de cada dimensión se calculó con la suma de sus indicadores dividido en el total del valor analizado, es decir, está ponderado por la suma total de los indicadores de cada una de los valores, lo cual hace que sea más ajustado a la realidad de la situación de todos los indicadores de cada dimensión de cada valor CERT, orientación al cliente, excelencia, responsabilidad y trabajo en equipo.

Con base, en el anterior diagrama radial se establece la proporción que tiene la empresa en cada una de las dimensiones de los valores CERT, así, dentro del valor de Excelencia se destaca el 83,86% en mejoramiento continuo que tiene la empresa frente a un 16,14% que cuenta en innovación, mostrando el interés que tienen por mejorar en cada uno de sus procesos, sin embargo, se nota que deben trabajar para mejorar la innovación. De igual forma se evidencia una paridad en las dimensiones de los valores Orientación al cliente y Trabajo en equipo, debido a que, tanto como cliente interno y cliente externo y estructuras formales e informales tienen porcentajes de participación muy cercanos, siendo esto algo beneficioso para la organización.

En el valor responsabilidad la dimensión de desempeño tiene un 58,31% frente a un 41,69% de compromiso, reflejando un buen desempeño en los colaboradores respecto al rendimiento en sus obligaciones, cabe destacar que el compromiso se ve afectado por un indicador que la empresa no tiene en cuenta en estos momentos, lo cual afecta el valor ponderado total. Aunque los valores son relativamente altos la empresa mantiene un estatus que al permanecer seguros en la gestión de sus operaciones normales, descuidando las nuevas tendencias existentes en el mercado, lo cual se observa a través del indicador de innovación.

Para la empresa, los clientes externos se categorizan según la oportunidad comercial que se tenga, entonces se pueden clasificar en: nuevos negocios, renovación (se renueva el contrato con los mismos servicios prestados), profundización (que es ofrecer los mismos productos aplicados a otros procesos) y venta cruzada (a un cliente antiguo se le ofrece un producto diferente). En esta empresa en este momento hay aproximadamente 15 clientes, pero la antigüedad promedio de cada uno es de 6 años. Como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los indicadores para cliente externo

Cliente externo	Quejas y reclamos	$\frac{\# \text{ quejas y reclamos al mes}}{\text{Total de registros al mes}}$	15%
	Recurrencia	$\frac{\# \text{ servicios ofrecidos de venta cruzada recurrentes al trimestre}}{\text{Total de clientes por año}}$	93%
	Satisfacción entrega/producto/Servicio	$\frac{\text{Fecha planeada de facturación} - \text{fecha real de la facturación}}{\text{fecha planeada de la facturación}}$	80%

Dentro la organización se implementa un software que tiene como nombre KUDO, esta herramienta le ayuda a la empresa con el control de número de reconocimientos, retroalimentaciones, conversaciones neutras, llamados de atención por recursos humanos, memorandos y descargos todo esto por trimestre a cada uno de los colaboradores. De este modo, se encontró que la empresa reporta 21 retroalimentaciones, 96 reconocimientos y 7 conversaciones, frente a las demás no se reportó en este primer trimestre del presente año, se encontró un 77% a reconocimientos y un 17% a retroalimentación; además, se estableció que la empresa atiende en un 75% los imprevistos que se le presentan a lo largo de un mes, lo anterior se refleja en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los indicadores para cliente interno

Cliente interno	Gestión de imprevistos	$\frac{\# \text{ imprevistos solucionados al mes}}{\text{Total de imprevistos al mes}}$	15%
	Índice de reconocimientos por año	$\frac{\# \text{ de reconocimientos logrados por trimestre}}{\text{Total de comunicaciones por trimestre}}$	93%
	Retroalimentación	$\frac{\# \text{ de retroalimentación por área en la mejora de procesos}}{\text{Total de participaciones en la mejora de procesos}}$	80%

La empresa pretende mejorar en cada uno de los procesos que se llevan a cabo, es por eso, que medir el mejoramiento en el día a día llega hacer una herramienta fundamental para cumplir a cabalidad los objetivos que se plantean, para esto usan el aplicativo Teamwork, el cual se enfoca en planear todas las actividades de cada proyecto de ese sistema, se determinó que la empresa incurre en un 69% en reprocesos

frente a los procesos que se ejecutan en un periodo dado. En cuanto a las ideas ejecutadas por mes frente a las ideas propuestas, se llega a un 22% respecto a la totalidad que se proponen por parte del personal; a su vez, la empresa tiene un 31% de inconformidades de sus clientes por mes, como se ve en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los indicadores para excelencia

Mejoramiento Continuo	Reprocesos	$\frac{(\#reprocesos \text{ en el periodo } n - 1) - (\#reprocesos \text{ en el periodo } n)}{\text{Total de reprocesos hasta periodo } n}$	69%
	Inversión en mejoramiento	$\frac{\# \text{ de ideas de mejoramiento ejecutadas por mes}}{\text{Ideas de mejoramiento propuestas por mes}}$	22%
	Productos/Servicios no conformes	$\frac{\# \text{ de inconformidades por mes}}{\text{Total de productos o servicios por mes}}$	31%

Con respecto a la excelencia la compañía requiere fortalecer este aspecto, ya que actualmente no maneja una política clara de promover la investigación, el desarrollo e innovación (I+D+i), por lo cual no es consciente de asignar presupuestos en ideas o programas que estimulen I+D+i, sin embargo, se identificó que presentan estudios y proyectos por parte de los colaboradores, con un porcentaje de aprobación y ejecución del 24% anualmente, tal como se refleja en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de los indicadores para excelencia

Innovación	Patentes, estudios y proyectos	$\frac{\# \text{ patentes autorizadas por año}}{\text{Total de empleados por año}}$	24%
	Ideas de innovación ejecutadas	$\frac{\# \text{ de ideas innovadoras realizadas (periodo } n)}{\text{Total de ideas innovadoras propuestas (periodo } n)}$	0%
	Porcentaje de inversión en I+D+i interno	$\frac{\text{Inversión para } I + D + i \text{ anual}}{\text{Presupuesto de la empresa anual}}$	0%

El control del desempeño dentro de la organización se mide por distintos mecanismos que permiten establecer los compromisos, reportes y demás, para así llevar una revisión frente a la productividad, uso de recursos y evaluación del desempeño de cada uno de los proyectos, se hacen dos reuniones tipo SCRUM diarias tanto con los equipos de proyectos en el mañana temprano, como con los gerentes de los proyectos a las 12:30 p.m., también se hacen comités quincenales con la alta gerencia para reportar los avances e impedimentos de los proyectos y cómo se han solucionado. Los indicadores tienen los valores de 72%, 83% y 95% respectivamente, como resultado de la gestión oportuna y efectiva que se hace de los proyectos, representado en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de los indicadores para responsabilidad

Desempeño	Productividad	$\frac{\# \text{ compromisos realizados por proyecto}}{\# \text{ compromisos planeados por proyecto}}$	72%
	Uso de recursos financieros	$\frac{\text{Recursos financieros utilizados por proyecto}}{\text{Recursos financieros presupuestados por proyecto}}$	83%
	Evaluación de desempeño	$\frac{\# \text{ de evaluaciones realizadas anualmente}}{\text{Total de empleados al año}}$	95%

El compromiso es un valor institucional dentro de la compañía, de manera que, la gerencia desea inculcar este en cada uno de sus colaboradores, actualmente la empresa presenta apenas un 4% a nivel de ausentismos en el último trimestre, del mismo modo, su nivel de participación en propuestas que se anticipen al mercado llega a hacer de un 83% anualmente. Sin embargo, consideramos que sería importante el poder establecer el impacto de la toma de decisiones, actualmente no se cuenta con esta métrica establecida, esto influye en la disminución del indicador para esta dimensión de compromiso, afectando el valor de Responsabilidad, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de los indicadores para responsabilidad

Compromiso	Toma de decisiones	$\frac{\# \text{ de soluciones con impacto positivo por periodo } n}{\text{Total de soluciones por periodo } n}$	0%
	Porcentaje de ausentismos	$\frac{\text{Cantidad de inasistencias por trimestre}}{\text{Total de asistencias establecidas en contrato por trimestre}}$	96%
	Proactividad	$\frac{\# \text{ de propuestas que anticipen el mercado por año}}{\text{Total de propuestas presentadas por año}}$	83%

Adicionalmente, la compañía cuenta con la política de agendar reuniones al finalizar la jornada lideradas por cada uno de los jefes de proyectos y que asisten los respectivos trabajadores del proyecto, de aquí se estableció que las comunicaciones formales presentadas durante un mes en un proyecto representan el 73% de la comunicación total de la compañía en el mismo periodo de tiempo. Por otro lado, los equipos encargados de los proyectos han demostrado un desempeño del 88% en el cumplimiento de las fechas pactadas en la entrega final de los mismos. No obstante, el indicador de liderazgo propuesto no lo conocen y por esto no se ha establecido ningún mecanismo para su recolección y posterior lectura, el equipo considera que la empresa debería tenerlo en cuenta para un futuro, lo anterior se resume en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de los indicadores para trabajo en equipo

Estructuras formales	Comunicación	<i># de decisiones autónomas del equipo de trabajo por mes</i>	75%
		<i>Totales de decisiones en el área por mes</i>	
	Desempeño por equipos	<i># de decisiones autónomas del equipo de trabajo por mes</i>	88%
		<i>Totales de decisiones en el área por mes</i>	
	Liderazgo	<i># de decisiones autónomas del equipo de trabajo por mes</i>	0%
		<i>Totales de decisiones en el área por mes</i>	

La empresa logró establecer que la participación de los equipos informales dentro de la organización ha venido desempeñado un papel de mediadores a posibles retos que se puedan presentar en un periodo determinado, estas intervenciones llegan a solucionar un 25% de estos desafíos que se exhiban, a su vez, el 80% de los colaboradores ha permanecido en la empresa en un periodo de 5 años, lo que demuestra un sentido de pertenencia por la compañía. En cambio, las interacciones interpersonales no se han venido incentivando por parte de la compañía, debido a la situación actual de pandemia requiere un distanciamiento social lo cual imposibilita este tipo de actividades, como se refleja en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de los indicadores para trabajo en equipo

Estructuras informales	Participación en soluciones	<i># de problemas solucionados por equipos informales en el periodo n</i>	25%
		<i># Retos presentados en el periodo n</i>	
	Pertenencia	<i># empleados que desean permanecer en la empresa los siguientes 5 años</i>	80%
		<i>Total de empleados del último año</i>	
	Interdisciplinariedad	<i># de empleados que participan en un equipo informal de la misma área</i>	0%
		<i>Total de empleados de un equipo informal</i>	

6. CONCLUSIONES

Este estudio hace parte de un conjunto de análisis que se viene realizando por el equipo de investigación sobre la cultura de BPM y sobre los valores CERT, en el esfuerzo de analizar de manera cuantitativa el efecto de estos valores en las medidas clásicas organizacionales de eficiencia y eficacia, con el fin de establecer cada vez de una manera más formal la importancia, relevancia e impacto de la cultura BPM, dentro de la gestión de las organizaciones.

Al implementar los indicadores planteados, se busca no solo medir el impacto de la cultura BPM en la eficiencia y la eficacia, sino que se genere una cultura de buenas prácticas que permitan no solo tener una medición, de una situación en un momento dado, sino que también permee con su uso las creencias y costumbres de los funcionarios, haciendo por un lado que sea natural medir y por otro que se tenga en el pensamiento, el hacer las cosas de una mejor forma cada día en los procesos en que trabaje.

Los indicadores planteados en la investigación, que se diseñaron para cada una de las dimensiones de los valores CERT, miden el impacto en términos de la eficacia y eficiencia de los procesos; la idea es que, si estos indicadores mejoran, se mejore también los resultados de la organización, a través de estos indicadores, se crea un vínculo directo entre los temas intangibles o cualitativos de la cultura, sus valores y sus dimensiones, para poder medirlos de manera cuantitativa, haciéndola más real para la gerencia de las empresas.

Se puede evidenciar que los indicadores desarrollados representan la situación de la empresa en cuanto a los valores CERT, también son una oportunidad para mostrar el camino a seguir, permitiendo desarrollar estrategias que se enfoquen en potencializar las relaciones con los clientes tanto interno como externos, así como, el compromiso y de esta forma mejorar la eficacia de la empresa.

Ahora bien, se tienen oportunidades de mejora para la innovación y las estructuras informales, con esto mejora la eficiencia de la empresa, sin embargo, se destaca que los indicadores de las estructuras informales dieron bajas dada la situación de la pandemia, que impide el trabajo en equipo más fluido para una mayor participación en las soluciones de los problemas, así como impide desarrollar mejor la interdisciplinariedad en los equipos.

De otra parte, si es bueno destacar que a la empresa le conviene trabajar en la dimensión de la innovación, ya que es una empresa de tecnología y no puede conformarse con los servicios que viene ofreciendo, sino que debe estar a la vanguardia de las tendencias del mercado, tanto para ofrecer nuevos servicios, como para obtener nuevos clientes.

REFERENCIAS

- [1] V. Hui, "ERM Effectiveness and Efficiency,". December, pp. 34–36, 2016.
- [2] M. Anguera, "La investigación cualitativa," *Educar*, vol. 10, no. 10, pp. 23–50, 1986.
- [3] L. Serrano and N. Ortiz, "Una revisión de los modelos de mejoramiento de procesos con enfoque en el rediseño," *Mac Ruairc, Gerry*, vol. 28, no. 125, pp. 13–22, 2012.
- [4] K. Garimella, L. Michael, and B. Williams, "Bpm (Gerencia De Procesos De Negocio)," *BMP (erencia Procesos Negocio)*, p. 39, 2008.
- [5] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers, "Introduction to Business Process Management," in *Fundamentals of Business Process Management*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 1–31.
- [6] M. Zairi, "Business process management: a boundaryless approach to modern competitiveness," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 64–80, 1997.
- [7] F. Ruiz and M. Piattini, "Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información Model Driven Engineering Aplicado a Business Process Management Castilla-La Mancha," *Dep. Tecnol. y Sist. Inf.*, 2007, pp. 2–31, 2014.
- [8] C. Rodríguez, "Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos.," *Rev. la Esc. Colomb. Ing.*, vol. 25, no. 98, pp. 23–29, 2015.
- [9] C. Y. Rodríguez, "Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos," *Rev. Esc. Colomb. Ing.*, vol. 25, no. 98, pp. 23–29, 2015.
- [10] W. Messner, "Measuring existent intercultural effectiveness in global teams," *Int. J. Manag. Proj. Bus.*, vol. 8, no. 1, pp. 107–132, 2015.
- [11] T. Schmiedel, J. Vom, and J. Recker, "Which cultural values matter to business process management?: Results from a global Delphi study," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 292–317, 2013.
- [12] M. Brîndușa, "Efficiency and Effectiveness within the Managerial Process," in *The 9th International Scientific Conference "Defense Resources Management in the 21st Century*, 2014, p. 5.
- [13] A. Szczepura, C. Davies, J. Fletcher, and A. Boussofiene, "Efficiency and Effectiveness in General Practice," *J. Manag. Med.*, vol. 7, no. 5, pp. 36–47, 1993.
- [14] M. Brîndușa, "Efficiency and Effectiveness Withing the Managerial Process Junior," in *The 9th International Scientific Conference*, 2014, p. 5.
- [15] M. Rojas, L. Jaimes, and M. Valencia, "Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo," *Espacios*, vol. 39, no. 6, 2018.
- [16] C. Rodríguez, C. Luque, and L. Lobaton, "Modelo para diagnosticar el nivel de madurez del equipo de trabajo bajo una cultura bpm," in *Congreso Internacional de Ingeniería Industrial UPTC*, Sep. 2017, pp. 1–11.
- [17] J. Vom and T. Sinnl, "Culture in business process management: A literature review," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 357–378, 2011.
- [18] J. vom Brocke and T. Schmiedel, "Culture in business process management: a literature review," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 357–378, 2011.
- [19] T. Schmiedel, J. vom Brocke, and J. Recker, "Which cultural values matter to business process management?," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 292–317, 2013.
- [20] V. Bosilj and L. Milanović, "The Role of Process Performance Measurement in BPM Adoption Outcomes in Croatia," *Econ. Bus. Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 117–143, 2015.
- [21] J. Vom and T. Schmiedel, "Culture in business process management: a literature review," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 357–378, 2011.
- [22] J. A. Tompkins, "Team-based continuous improvement: How to make the pace of," *Mater. Handl. Eng.*, vol. 48, no. 6, pp. 71–72, 1993, Recuperado: <https://search.proquest.com/docview/213288124/fulltext/embedded/85HL0PZ1CCJZLG9B?source=fedsrch>
- [23] B. Quentin, "Customer-centered problem solving," 1999.
- [24] O. L. C. Sánchez, M. C. B. Picoita, A. E. L. Ushiña, P. E. M. Sánchez, and M. A. H. Aráuz, "Personnel selection policies and customer satisfaction in ecuador public hospitals," *Rev. Cuba. Inv. Biomed.*, vol. 37, no. 1, pp. 116–121, 2018.

- [25] S. Tumbas, T. Schmiedel, M. Bringmann, and J. vom Brocke, "Developing a BPM-supportive organizational culture: On the importance of contextual factors," *ECIS 2013 Complet. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2013, Recuperado: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84905833683&partnerID=tZOTx3y1>
- [26] J. Díaz Olaya, M. Díaz Mercado, and S. Morales Cepeda, "Motivación laboral en trabajadores de empresas formales de la ciudad de Bogotá," *Rev. Iberoam. Psicol. Cienc. y Tecnol.*, vol. 7, no. 1, pp. 59–78, 2014.
- [27] R. Greenleaf, "Drucker Peter, 'La Gerencia', Ed. El Ateneo (1995) p.17. 16," pp. 16–25, 1995.
- [28] M. de F. Bruno-Faria and M. V. D. A. Fonseca, "Medida Da Cultura De Inovação: Uma Abordagem Sistêmica E Estratégica Com Foco Na Efetividade Da Inovação," *Rev. Adm. Innov. - RAI*, vol. 12, no. 3, p. 56, 2015.
- [29] Y. Romero and L. Fontanet, "Artículo original Comerciales Management System For Commercial Products," *Redalyc*, vol. XXXII, no. 1, pp. 48–59, 2011.
- [30] I. OCDE, *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*, Third. París: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT, 2018, 2015.
- [31] J. Zou, W. Chen, N. Peng, and X. Wei, "Efficiency of Two-Stage Technological Innovation in High Patent-Intensive Industries That Considers Time Lag: Research Based on the SBM-NDEA Model," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [32] N. Rodríguez, "La innovación: clave del éxito empresarial," 2014.
- [33] L. Jaimes, M. Luzardo, and M. D. Rojas, "Factores Determinantes de la Productividad Laboral en Pequeñas y Medianas Empresas de Confecciones del Área Metropolitana de Bucaramanga, Colombia," *Inf. tecnológica*, vol. 29, no. 5, pp. 175–186, 2018.
- [34] J. Heizer and B. Render, *Dirección de la producción y de operaciones*, 11th ed. Barcelona, 2015.
- [35] I. R. Gellatly, J. P. Meyer, and A. A. Luchak, "Combined effects of the three commitment components on focal and discretionary behaviors: A test of Meyer and Herscovitch's propositions," *J. Vocat. Behav.*, vol. 69, no. 2, pp. 331–345, 2006.
- [36] J. C. Wombacher and J. Felfe, "Dual commitment in the organization: Effects of the interplay of team and organizational commitment on employee citizenship behavior, efficacy beliefs, and turnover intentions," *J. Vocat. Behav.*, vol. 102, no. March 2016, pp. 1–14, 2017.
- [37] E. Freeman and J. McVea, "A Stakeholder Approach to Strategic Management," *SSRN Electron. J.*, vol. 1, no. January, pp. 2–33, 1986.
- [38] W. Herrera and I. Mahecha, "Transparencia, razón pública y rendición de cuentas en las empresas," *Veritas*, vol. 41, no. 41, pp. 39–68, 2018.
- [39] R. A. Tatamuez-Tarapues, A. M. Domínguez, and S. M. Matabanchoy-Tulcán, "Revisión sistemática: Factores asociados al ausentismo laboral en países de América Latina," *Univ. y Salud*, vol. 21, no. 1, pp. 100–112, 2018.
- [40] A. E. Crenças *et al.*, "Revista Cuidarte," vol. 8, no. 1, pp. 1509–1518, 2017, Recuperado: <http://www.revistacuidarte.org/index.php/cuidarte/article/download/367/759>
- [41] R. Becherer and J. Maurer, "The Proactive Personality Disposition and Entrepreneurial Behavior among Small Company Presidents," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 1, no. 1, p. 8, 1999.
- [42] N. Rodríguez, "Influencia de la personalidad del empresario sobre el emprendimiento estratégico de la PYME: un análisis multinivel," Universidad Miguel Hernández de Elche, 2013.
- [43] H. O. Charry, "La gestión de la comunicación interna y el clima organizacional en el sector público," *Minist. Educ. Unidad Gestión*, vol. 9, no. 1, pp. 25–34, 2018, Recuperado: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2219-71682018000100003&lang=en<http://www.scielo.org.pe/pdf/comunica/v9n1/a03v9n1.pdf>
- [44] C. Ruíz, K. Jocelyne, A. Silva, G. Neif, A. Vanga, and M. Gutierrez, "Ética empresarial y el desempeño laboral en Organizaciones de Alta Tecnología (OAT)," *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 13, no. 43, pp. 417–441, 2008.
- [45] I. Chiavenato, *Comportamiento organizacional*, 3rd ed., vol. 3. Ciudad de México, 2017.
- [46] C. López, L. M. Guevara, and J. Robledo, "La organización informal en los equipos innovadores: un estudio de caso comparativo," *AD-minister*, no. 29, pp. 177–202, 2016, doi: 10.17230/ad-minister.29.9.
- [47] R. Likert, *The human organization: Its management and value*, 1st ed., vol. 1. New York, 1967.
- [48] J. P. Meyer and L. Herscovitch, "Commitment in the workplace: Toward a general model," *Hum. Resour. Manag. Rev.*, vol. 11, no. 3, pp. 299–326, 2001.
- [49] D. Roque, M. Villanueva, and T. Rodriguez, "El Compromiso En El Trabajo Y Su Relación Con Las Políticas De Recursos Humanos: Modelo Y Factores Relacionados," *Eumed.Net*, no. octubre, pp. 89–104, 2017, Recuperado: <http://www.eumed.net/libros-gratis/actas/2017/economia-retos/4-el-compromiso-en-el-trabajo.pdf>
- [50] J. Robledo, C. López, and J. D. Pérez, "Desarrollo Metodo de evaluacion capacidades de innovacion," no. 15, pp. 133–148, 2010.
- [51] M. E. Moreno Rubio, "Teoría de Sistemas e Historia: un acercamiento interdisciplinario para la investigación científica," *Relac. Estud. Hist. y Soc.*, vol. 40, no. 159, p. 171, 2020.
- [52] S. Rivero and M. Díaz, "La interdisciplinariedad en la organización de los procesos institucionales Interdisciplinarity in institutional process organization," *Acimed*, pp. 1–18, 2008.

Diseño de un modelo para la Gestión del Conocimiento con Enfoque BPM

Claudia Yadira Rodríguez Ríos¹

Jhon Alejandro Lasso Buesaquillo²

Andrés Julián Gutiérrez Oviedo³

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

En el presente trabajo se presenta un modelo de gestión de conocimiento con enfoque BPM que tiene como objetivo mejorar los procesos organizacionales, garantizando que los profesionales puedan estar al tanto de la información nueva y cambiante, mejorando de esta manera sus procesos. Surge como respuesta a la importancia del conocimiento en las organizaciones, reconociendo que su mayor ventaja competitiva es la base de conocimientos de los empleados. En este documento se realiza una revisión de la literatura en relación con la forma en la que las organizaciones gestionan su conocimiento, analizando los métodos existentes y sus características. Como resultado, se plantea un modelo de gestión del conocimiento, que empieza con las fases de descubrimiento del proceso, descubrimiento del conocimiento, digitalización del conocimiento, aprehensión del conocimiento (que incluye las lecciones aprendidas e iniciativas de mejora), transferencia del conocimiento y difusión del conocimiento. El desarrollo de este modelo crea valor agregado a las organizaciones al presentarles un camino a seguir, estableciendo pautas para la mejora continua en el fomento del conocimiento y la cultura organizacional. La innovación propuesta en el modelo radica en que se parte de los procesos organizacionales gestionados a través del modelo de Business Process Management BPM y el ciclo de vida de los procesos.

¹ Contacto: claudia.rodriguez@escuelaing.edu.co

² Contacto: jhon.lasso@mail.escuelaing.edu.co

³ Contacto: andres.gutierrez-o@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El manejo del conocimiento se convierte cada vez más en un factor importante dentro de la sociedad y dentro de las organizaciones, mostrándose como un método de evaluación de madurez y competitividad de las empresas. Debido a esto, la gestión de conocimiento debe ser tenida en cuenta dentro de las organizaciones para que se empiecen a fomentar la práctica del incentivo y creación de este [1]. Logrando un incremento de los conocimientos de sus empleados, mejorando su capital intelectual, fomentando el desarrollo, la unidad y la cultura organizacional [2].

La gestión de conocimiento puede describirse como la utilización de la información, las personas y los medios, con el fin de generar nuevas habilidades, nuevos conocimientos y experiencias que le facilitará a la empresa mejorar sus procesos y su competitividad [3], así mismo, la gestión del conocimiento puede complementarse con un enfoque de gestión de procesos de negocio BPM, que le permite el mejoramiento continuo de todos sus procesos y habilidades [4].

De la misma manera, dado los avances tecnológicos, la información puede ser transferida y distribuida de una manera más fácil a través de los diferentes medios digitales como lo son los de la Web 2.0, las bases de datos, artículos y las revistas online, etc. Esta facilidad de transferir conocimiento ha permitido de igual manera la creación de nuevo conocimiento, convirtiéndose en una medida de competencias dentro de las organizaciones para la implementación y desarrollo de este tipo de modelos [5].

Este documento plantea un ciclo de gestión de conocimiento basado en BPM con las fases de descubrimiento del proceso, descubrimiento del conocimiento, digitalización del conocimiento, aprehensión del conocimiento (que incluye las lecciones aprendidas e iniciativas de mejora), transferir el conocimientos, y difusión del conocimiento, las cuales permiten llevar un manejo adecuado de la información y los datos que se transforman en conocimiento tanto tácito como explícito a través del modelo SECI [5, 6], que por medio de los procesos de socialización, externalización, combinación e internalización transforman el conocimiento de maneras tácitas a explícitas y viceversa [7].

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Business Process Management BPM

BPM es un conjunto de métodos, herramientas y tecnologías utilizados para diseñar, representar, analizar y controlar procesos de negocio operacionales, así mismo se define, como un enfoque centrado en los procesos para mejorar el rendimiento que combina las tecnologías de la información con metodologías de proceso y gobierno [7]. BPM es una colaboración entre personas de negocio y tecnólogos para fomentar procesos de negocio efectivos, ágiles y transparentes [5]. BPM es un sistema de gestión integrado basado en procesos; es un sistema porque es un conjunto de elementos, interrelacionados entre sí, que interactúan para conformar un todo, el cual permite hacer una gestión adecuada de todos sus procesos, tanto los operativos como los de negocio que trabaja en conjunto con la tecnología de información y los actores organizacionales que intervienen modela, examina e inspecciona los procesos que generan valor dentro de una compañía [8].

2.2 Gestión del Conocimiento

Se ocupa del uso razonable del recurso de conocimiento y su aplicación intencionada en la empresa, desarrolla estrategias sobre cómo se puede promover e implementar el conocimiento en una forma orientada hacia el futuro, como un recurso para mejorar el valor [9, 10]. El conocimiento es una fuente de competencia, que permite a las organizaciones, obtener un mayor y mejor resultado en sus actividades y procesos cotidianos, Porter y Miller fueron los primeros en identificar este factor de ventaja y empezaron a desarrollar una gestión que permitirá, la recolección, identificación y gestión de este [11, 12]. El uso y gestión adecuada del conocimiento mejora el aprendizaje y a su vez crea oportunidades para acciones de intervención en las diferentes áreas, que permiten el desarrollo de las organizaciones [13].

Sin embargo, existen muchos tipos de conocimientos, que se caracterizan dependiendo de su utilidad o el enfoque que se les dé. En el presente capítulo, se planteará el conocimiento en dos características, conocimiento tácito y conocimiento explícito [6]. El conocimiento tácito implica una serie de conocimientos basado en la experiencia y que constituye un recurso intangible que toma formas multivariadas [14], el conocimiento explícito, se presenta en diferentes documentos, informes, folletos o bases de datos. A su vez, se distingue el conocimiento en conocimiento interno de las organizaciones y conocimiento externo [15]. El conocimiento interno se puede relacionar con conocimiento tácito de las organizaciones, que se ven reflejados en la experiencia de los empleados en sus diferentes actividades y procesos. El conocimiento externo de las organizaciones hace referencia a los diferentes conocimientos que se puede utilizar y adquirir de organizaciones externas [13, 15].

El conocimiento es información cuya certeza depende del contexto que ofrece a las personas y organizaciones la capacidad de actuar. El conocimiento es el resultado de una serie de tres transformaciones sucesivas, de la realidad a los datos, de los datos a la información y de la información a conocimiento [16, 17].

3. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una búsqueda sistemática de información en diversos artículos científicos, los cuales orientaron la investigación con una rigurosa descripción contextual de los temas a tratar a lo largo de este. Se hizo una previa selección de artículos para identificar, diferenciar y escoger el material pertinente que se acogiese a los requerimientos teóricos de la investigación, de esta forma determinar los conceptos claves que permitan establecer qué aspectos para la Gestión del Conocimiento con enfoque BPM en una organización. Además, se consultaron bases de datos científicas, tales como ScienceDirect, JSTOR, Emerald, ProQuest y EBSCO. Las palabras claves empleadas fueron: BPM, culture, KM, Gestión de conocimiento, Data Management, métricas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Modelo de gestión del conocimiento basado en procesos

El modelo de gestión del conocimiento que se propone contempla las siguientes fases (Figura 1): descubrimiento del proceso, descubrimiento del conocimiento, digitalización del conocimiento, aprehensión del conocimiento (lecciones aprendidas e iniciativas de mejora), transferencia del conocimiento y difusión del conocimiento.



Figura 1. Modelo para la Gestión del Conocimiento con enfoque BPM en una organización

4.1.1 Fase 1: Descubrimiento del proceso de negocio

Un proceso de negocio es el conjunto de actividades, que están relacionadas de forma lógica y con una determinada secuencia con el fin de apoyar los objetivos organizacionales mediante la implementación de sus recursos [18, 19]. La fase de identificación del proceso tiene como objetivo definir sistemáticamente el

conjunto de proceso y actividades de las organizaciones, a través de criterios de priorización [2]. Lo más importante para identificar un proceso es tener en cuenta que genere un valor para el negocio, por dicha razón es pertinente que dentro de la empresa se tenga una cadena de valor o mapa de procesos, de esta manera se tendrá un panorama de todos los procesos y su aporte a los objetivos organizacionales de la empresa, se facilita dar una priorización para escoger los procesos a trabajar, seleccionando los más críticos o importantes [15, 20].

En esta fase se conoce el proceso, a través de identificar claramente, sus clientes, primario, secundario, indirecto, externo, identificar los proveedores, los indicadores, si existen, los controles y seguimiento de reportes de resultados, las acciones operativas y administrativas que tiene el proceso, los eventos, las excepciones, las normas y reglas de negocio para la toma de decisiones, los involucrados, que pueden ser actores organizacionales o funcionales, es decir, qué, cómo, cuándo, dónde y para qué del proceso [8, 21].

Dentro del ciclo se plantea el uso de tres criterios que permitan a las organizaciones identificar los procesos y actividades más importantes, estos son: importancia, difusión y viabilidad [22]. Ahora bien la importancia, tiene como enfoque aspectos como la rentabilidad, la continuidad, la contribución y el nivel de desarrollo y crecimiento del proceso; la difusión, donde se tiene como objetivo identificar la cantidad de problemas que presentan los diferentes procesos y el impacto a la organización; y por último la viabilidad, que determina la susceptibilidad de las mejoras posibles [2, 23], cabe destacar siempre tener en cuenta el costo beneficio de las propuestas de mejora que se proponen.

4.1.2 Fase 2: Descubrimiento del conocimiento

El valor real del conocimiento reside en la información que se puede extraer de él, se verifica que sea útil para la toma de decisiones o la comprensión de fenómenos presentes al entorno del negocio, generando un factor diferenciador dentro del mercado. Debe descubrirse tanto el conocimiento tácito como explícito que la organización posee, de esta misma manera el capital intelectual, el cual comprende el capital relacional/social, el capital humano y el capital documental; definidos respectivamente como las relaciones entre los actores involucrados en el proceso de negocio, las capacidades intrínsecas de un individuo y por último lo establecido en un formato único en posesión de la compañía [13].

Para lograr el descubrimiento del conocimiento dentro de las organizaciones se deben realizar una serie de actividades como, la obtención, análisis, reconstrucción y síntesis de la información. La cual se obtiene a través de una variedad de medios como resúmenes ejecutivos, mapas conceptuales, que buscan identificar y transformar toda la información en conocimiento tácito a explícito [15]. Los pasos iniciales para el proceso de recolección pueden ser pautados por la determinación del personal más calificado o seleccionado bajo criterios establecidos enfocados en la obtención de información. La estructuración de una entrevista o encuesta que permita extraer la información de cada involucrado en los procesos analizados [24].

En cuanto al descubrimiento de conocimiento que se acredita al capital humano se dice que este conlleva mayor esfuerzo por parte de la organización, debido a que todos los empleados no están dispuestos a compartir fácilmente sus habilidades, experiencias, destrezas, entre otros; para lograr la cooperación total se hace necesario el uso de incentivos y reconocimientos brindados por la gerencia de la empresa [24, 25].

Por otra parte, *Big Data* maneja un gran volumen de información, convirtiéndose en una herramienta fundamental, que nos permite una correcta gestión del conocimiento descubierto. El reto de las empresas, es darle un tratamiento adecuado y sistemático al conocimiento que ha sido adquirido por múltiples formas; dicho tratamiento es conocido como la gestión de datos, es una práctica amplia que abarca un número de disciplinas de datos, incluido el almacenamiento, la integración, la calidad, la gobernanza de datos, gestión de contenido, procesamiento de eventos, administración de bases de datos, etc. [5, 26].

4.1.3 Fase 3: Digitalización del conocimiento

Gracias a las nuevas tecnologías que han venido surgiendo con el tiempo, la información adquirida es almacenada y compartida con todos aquellos individuos que intervienen dentro del proceso de negocio de

forma clara, por medio del uso de sistemas uniformes según lo estipulado por la empresa. Es decir, que el conocimiento explícito se almacena y se presenta nuevamente de forma explícita [5].

Esta es de las principales fases que una empresa debe implementar, ya que sin una adecuada digitalización del conocimiento adquirido es imposible llegar a la *Gestión del conocimiento*. Sin embargo, las bases de datos no son los únicos medios por los cuales se puede llevar a cabo esta transformación del conocimiento, existen muchas herramientas de la tecnología digital, como blogs, revistas y artículos en línea que permiten tener acceso a esta información explícita, pudiendo ser digitalizada por los entes interesados [27].

La digitalización del conocimiento es transformar el medio de acceso y de registro de los datos, la información y el conocimiento; se puede representar como la asociación de los conocimientos, el cual es alentado por la flexibilidad que se puede obtener con los diferentes portales y medios tecnológicos como páginas web, documentos, artículos y guías virtuales que le permiten a las organizaciones tener el control y acceso de manera rápida y constante por medio del internet [4], algunos ejemplos que se pueden mencionar son las bibliotecas digitales o sistemas de base de conocimiento en la nube [25, 28].

4.1.4 Fase 4: Aprehensión del conocimiento

Después de haber digitalizado la información en las bases de datos, la siguiente fase tiene como fundamento la apropiación y aprehensión de este conocimiento, llevándolo a la práctica en las diferentes actividades dentro de su entorno de trabajo o cumpliendo con el fin que se buscaba lograr [25].

Para que la información adquirida se traduzca en conocimiento, la información debe ser internalizada [25], por medio de un proceso individual de transformación donde el individuo a entendido y da un sentido a la información en el contexto de su propia situación [27], convirtiéndola en experiencia a través de la práctica. La creación del conocimiento y la traducción del conocimiento al contexto necesario, para cada uno de los interesados, es el inicio donde los individuos empiezan a crear conocimiento dentro de ellos y pueden aplicarlo a en su vida cotidiana y profesional [27].

Cuando se crea un nuevo conocimiento y se traduce a la práctica, es evidente para uno mismo y los demás a través de cambios en actitudes, habilidades, comportamiento y las lecciones aprendidas, que da inicio a las iniciativas de mejora para los procesos [27], cuando la información se transforma en conocimiento y luego se incorpora en las rutinas diarias, esto se convierte en conocimiento tácito [27]. No obstante, esta transformación de conocimiento a tácito, a través del tiempo logra aumentar el conocimiento de las organizaciones por medio de nuevos conocimientos generados en la práctica [5], donde se presentan diferentes situaciones de mejora en lo ya establecido, como consecuencia de la experiencia adquirida, en el proceso de toma de decisiones del individuo en cada situación del día tras día [29].

La aprehensión del conocimiento se logra a través de una serie de actividades, que relaciona toda la información digitalizada dentro de las bases de datos y la interacción de cada uno de los individuos de la organización. Algunas de estas actividades se resumen en el uso de documentos y archivos, dentro del manejo y práctica de la organización en diferentes plataformas, el acceso virtual a los diferentes boletines, informes y manuales, el acceso centros de ideas y lecciones aprendidas y a las diferentes bases de datos que se tiene en la organización [2, 13].

Una característica de la aprehensión del conocimiento son las prácticas y experiencia de las personas en el día a día, además del conocimiento aprendido y el que enseñan a los que están a su alrededor [2].

4.1.5 Fase 5: Transferencia de conocimiento

Partiendo del conocimiento explícito digitalizado, el proceso de transferencia a través de la organización debe ser transferido a otras personas, para lograr cooperación u otras acciones que mejorarán a la organización, aumentando su conocimiento [5]. La transferencia de conocimiento tiene que ver con el movimiento de información e ideas de un grupo a otro [16], ocurriendo dentro y entre individuos, cuando están escuchando, pensando, resolviendo problemas, reflexionando, discutiendo y conversando [10].

La transferencia de conocimiento puede ser evidente dentro del entorno de la práctica o externamente, por ejemplo, a través de las publicaciones en revistas académicas [30], donde se comparten, aplican y transfieren el conocimiento en el contexto de sus actividades cotidianas, para alcanzar objetivos organizacionales y crear valor [31]. Para lograr este tipo de propósitos durante el proceso de transferencia, se utilizan herramientas digitales, manuales o esquemas, donde se le permita dar acceso a todos los miembros de la organización de la información recolectada y archivada dentro de las bases de datos [15].

Las herramientas de tecnología digital que pueden ayudar a este proceso son las herramientas de reflexión en línea como blogs, revistas en línea, foros en línea y redes sociales, donde las personas pueden reunirse virtualmente y discutir información, aumentando su comprensión a medida que trabajan para construir conocimiento [27]. Este tipo de herramientas serán utilizadas por los niveles altos en las organizaciones, que transferirán el conocimiento a los niveles más bajos [30], a través del modelo de enseñar el conocimiento explícito de manera tácita, fomentando factores como la cultura organizacional por medio del diálogo que se construye [16], movilizándolo el conocimiento, generando valor a la empresa, con la cultura organizacional y la creación de conocimiento [27].

De la misma manera para poder obtener la transferencia, existen una serie de prácticas y actividades, que se deben realizar para su cumplimiento, tales como; ofrecer espacios para foros y comunidades de prácticas y manejos organizacionales, proporcionar soporte técnico, ofrecer conferencias y dar a conocer los diferentes informes de investigación que se tengan [2, 13].

4.1.6 Fase 6: Difusión de conocimiento

La difusión del conocimiento explícito es la última fase, necesaria para completar el ciclo de proceso de gestión del conocimiento. Cuando el conocimiento se difunde o se comparte, los otros lo reciben como información, haciendo que se reinicie el ciclo [10]. La distribución hace referencia a la importancia del conocimiento desde y hacia el entorno, esta distribución está relacionada con la entrada de conocimiento y la salida de conocimiento tanto en forma tácita como explícita [27].

Sin embargo, en esta fase el conocimiento se comparte con entes e individuos fuera de la organización, haciéndolo de una manera global. De esta manera el conocimiento de la organización es recibido por otros como una información en formas de artículos, revistas, gráficos, diagramas y modelos, es decir Información en palabras u otras formas simbólicas [32], estos diferentes documentos creados, son difundidos a través de las herramientas de tecnología digital, las cuales están compuestas por podcasts, presentaciones online, wikis, blogs, mapas conceptuales y mentales, junto con las redes sociales, encontrándose englobadas dentro de La Web 2.0, cuyas habilidades gestionan de una mejor manera el conocimiento [5].

Este conocimiento explícito ya generado, al tener una mayor facilidad de distribuirse y replicarse entre los interesados, tiene la misma facilidad para que pueda generar y crear más conocimiento explícito a través de investigaciones, artículos y revistas dentro de las demás organizaciones, permitiendo abordar y crear de una manera más profunda todos los conocimientos explícitos ofrecidos [2, 5]. Esta difusión se logra a través de actividades que permiten la relación y socialización entre las organizaciones, consiguiendo de esta manera compartir y transferir la información y conocimiento recolectado [33]. Algunas de estas actividades se plantean como la formación de empresas conjuntas entre organizaciones, participación en comunidades de prácticas interorganizacionales, uso de redes de conocimiento interorganizacional, participación en conferencias interorganizacionales y publicación de artículos de investigación en revistas indexadas [2, 13].

5. CONCLUSIONES

En este documento planteamos una gestión y manejo del conocimiento a través de un modelo de conocimiento basado en un enfoque BPM, que a través de la era de la digitalización se ha convertido en un factor importante, ya que por medio de estas se ha podido transformar, distribuir y difundir una gran cantidad de información, mejorando el conocimiento de las organizaciones y mejorando sus procesos a través de la práctica y las experiencias adquiridas durante el proceso.

El mejoramiento continuo es la base básica del enfoque BPM, ya que por medio del enfoque holístico gestiona los procesos de la mejor manera. Y que, a partir de la creciente cantidad de datos, su almacenamiento, transformación y difusión, las herramientas tecnológicas digitales permitirán que estos procesos se realicen de una manera más rápida y masiva.

En función de esta virtualización de la información, todos los interesados serán participes de esta información, generando nuevo conocimiento y creando nuevas oportunidades de gestionar y manejar procesos específicos dentro de sus respectivas áreas de trabajo., permitiendo tomar mejores decisiones en diferentes contextos presentados. De este modo, toda la cadena de procesos se podrá optimizar y mejorar. El modelo BPM administrará el proceso a través de nueva información, cada vez que los ciclos del proceso de conocimiento se activen.

Concluyendo de esta manera que el objetivo de la gestión de conocimiento es mejorar la capacidad de las organizaciones, su capital intelectual y la de todos sus empleados, así como sus datos internos, externo y públicos. Estos factores aportan a la competitividad de la empresa y por lo tanto deben estar respaldados por la combinación planteada en este documento del modelo de gestión del conocimiento y BPM.

Cómo trabajo futuro, se puede implementar este modelo en una empresa para ver su aplicación e identificar posibles mejoras al mismo.

REFERENCIAS

- [1] S. Lupita and O. Néstor, "Una revisión de los modelos de mejoramiento de procesos con enfoque en el rediseño," *Estud. Gerenciales*, vol. 28, no. 1, pp. 13–22, 2012, Recuperado: www.elsevier.es/estudios_gerenciales
- [2] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. a. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management*, First. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [3] M. Martínez, "Relaciones entre cultura y desempeño organizacional en una muestra de empresas colombianas: Reflexiones sobre la utilización del modelo de denison," *Developm.* vol. 23, no. 40, pp. 163–190, 2010.
- [4] T. Schmiedel, J. Vom Brocke, and J. Recker, "Development and validation of an instrument to measure organizational cultures' support of Business Process Management," *Inf. Manag.*, vol. 51, no. 1, pp. 43–56, 2014.
- [5] M. S. Tabares, L. Giraldo, and L. Joyanes, "Improving the business processes management from the knowledge management," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2016, p. 8.
- [6] I. Nonaka and Y. Takeuchi, "Gestión del Conocimiento," *Res. Gate*, no. January, 1991.
- [7] A. Pourshahid *et al.*, "Business process management with the user requirements notation," *Electron. Commer. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 269–316, Dec. 2009.
- [8] C. Rodríguez, "Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos," *Esc. Colomb. Ing. Julio Garavito.*, vol. 25, no. 98, pp. 23–29, 2015.
- [9] Y. Yin, S. Qin, and R. Holland, "Development of a design performance measurement matrix for improving collaborative design during a design process," *Int. J. Prod. Perform. Manag.*, vol. 60, no. 2, pp. 152–184, Jan. 2011.
- [10] D. Paschek, L. Ivascu, and A. Draghici, "Knowledge Management – The Foundation for a Successful Business Process Management," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 238, no. October 2019, pp. 182–191, 2018.
- [11] G. A. Wolusky, "A Quantitative Study of Faculty Perceptions and Attitudes on Asynchronous Virtual Teamwork Using the Technology Acceptance Model," *ProQuest Diss. Theses*, p. 189, 2016, Recuperado: https://search.proquest.com/docview/1770080998?accountid=13042%0Ahttp://oxfordfx.hosted.exlibrisgroup.com/oxford?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+%26+theses&sid=ProQ:Education+Database&atitle=&title=A+
- [12] M. Porter and M. Miller, "Las estrategias competitivas y su importancia en la buena gestión de las empresas," *Rev. ciencias económicas*, vol. 28, no. 1, pp. 247–276, 1985.
- [13] C. Holsapple and K. Jones, "Exploring primary activities of the knowledge chain," *Knowl. Process Manag.*, vol. 11, pp. 155–174, Jul. 2004.
- [14] T. Blumentritt, T. Mathews, and G. Marchisio, "Game Theory and Family Business Succession An Introduction," *Fam. Bus. Rev.*, vol. 26, pp. 51–67, Mar. 2013.
- [15] R. Landry, N. Amara, A. Pablos-Mendes, R. Shademani, and I. Gold, "The knowledge-value chain: a conceptual framework for knowledge translation in health," *Bull. World Heal. Organ.*, vol. 84, pp. 597–602, Aug. 2006.
- [16] M. Evans, K. Dalkir, and C. Bidian, "A Holistic View of the Knowledge Life Cycle: The Knowledge Management Cycle (KMC) Model," *Electron. J. Knowl. Manag.*, vol. 12, no. 2, pp. 85–97, 2014.
- [17] M. Shongwe, "An Analysis of Knowledge Management Lifecycle Frameworks: Towards a Unified Framework," *Electron. J. Knowl. Manag.*, pp. 140–153, Jan. 2016.

- [18] A. Engels *et al.*, "Co-occurring Anxiety Influences Patterns of Brain Activity in Depression," *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, vol. 10, pp. 141–156, Mar. 2010.
- [19] F. J. O'Donnell and A. H. B. Duffy, "Modelling design development performance," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 22, no. 11, pp. 1198–1221, 2002.
- [20] T. Schmiedel, J. Recker, and J. vom Brocke, "The relation between BPM culture, BPM methods, and process performance: Evidence from quantitative field studies," *Inf. Manag.*, vol. 57, no. 2, pp. 103–175, 2019.
- [21] M. Kohlbacher and H. Reijers, "The effects of process-oriented organizational design on firm performance," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 245–262, 2013.
- [22] L. K. Larkey, "Toward a Theory of Communicative Interactions in Culturally Diverse Workgroups," *Acad. Manag. Rev.*, vol. 21, no. 2, pp. 463–491, 1996.
- [23] J. vom Brocke and T. Sinnl, "Culture in business process management: A literature review," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 357–378, 2011.
- [24] V. Bosilj, L. Milanović, and D. Suša, "The Role of Process Performance Measurement in BPM Adoption Outcomes in Croatia," *Econ. Bus. Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 117–143, 2015.
- [25] A. Canals, M. Boisot, and I. MacMillan, "Evolution of knowledge management strategies in organizational populations: A simulation model," Jan. 2004.
- [26] C. L. Russom, C. A. LaLone, D. L. Villeneuve, and G. T. Ankley, "Development of an adverse outcome pathway for acetylcholinesterase inhibition leading to acute mortality.," *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 33, no. 10, pp. 2157–2169, Oct. 2014.
- [27] A. Hamilton, J. Coldwell-Neilson, and A. Craig, "Development of an Information Management Knowledge Transfer Framework for Evidence-Based Occupational Therapy.," *VINE*, vol. 44, pp. 59–93, Feb. 2014.
- [28] M. Evans, K. Dalkir, and C. Bidian, "A Holistic View of the Knowledge Life Cycle: The Knowledge Management Cycle (KMC) Model," 2014. Recuperado: www.ejkm.com
- [29] S. Theresa, vom B. Jan, and R. Jan, "Which cultural values matter to business process management Results from a global," *Bus. Process Manag. J.*, pp. 292–317, 2013.
- [30] C. Liyanage, T. Elhag, T. Ballal, and Q. Li, "Knowledge communication and translation—A knowledge transfer model," *J. Knowl. Manag.*, vol. 13, pp. 118–131, May 2009.
- [31] C. Dombrowski *et al.*, "Elements of Innovative Cultures," *Knowl. Process Manag.*, vol. 14, pp. 190–202, Jul. 2007.
- [32] M. Alavi and D. Leidner, "Review: Knowledge Management and Knowledge Management Systems: Conceptual Foundations and Research Issues," *MIS Q.*, vol. 1, p. 107, Mar. 2001.
- [33] J. F. Gomez Cepeda, "Diseño de un modelo de evaluación de procesos clave de negocio para la implementación de BPM (Business Process Management) en las MiPymes Colombianas," p. 68, 2019.

Resultados de una revisión sistemática de la literatura acerca de la transformación digital en el sector de alojamiento y hospedaje

Helien Parra Riveros¹
Daniela Alejandra Trujillo Zapata²
Universidad Santo Tomás
Colombia

En la última década el uso de tecnologías digitales en todos los renglones de la economía se ha acelerado exponencialmente, y los diversos sectores han generado estrategias adaptativas para su inclusión de forma ágil y asertiva. Siendo el sector de alojamiento y hospedaje uno de los principales actores de la economía de servicios en la mayoría de las naciones, es importante estudiar y mejorar los procesos de creación, adaptación y desarrollo de cultura digital en todos los procesos y actores del servicio, adaptados a las condiciones locales particulares. La actual pandemia aceleró este proceso de digitalización, por lo que es necesario, en los procesos de reactivación económica, reconocer las principales tendencias a nivel global en adaptación de tecnologías digitales para contar con información que oriente a sectores, agremiaciones y gobernantes a diseñar estrategias efectivas para este propósito. Este capítulo, producto de un proyecto de investigación, presenta una revisión sistemática de la literatura científica en la que se concluye que los principales desafíos y barreras en el sector son: el relacionamiento personalizado con los clientes, la cultura digital creciente, la regulación y construcción de capacidades desde el estado en un sector conservador altamente atomizado y disperso con bajos esquemas de liderazgo, con nuevos actores dominantes en el ecosistema digital, lo que plantea una reflexión sobre el papel del estado y los gremios en estos procesos de transformación digital.

¹ Ingeniero Industrial y Magíster en Ingeniería Industrial.

Contacto: helienparra@usantotomas.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Industrial.

Contacto: danielatrujillo@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital en las empresas se ha vuelto un factor vital para permanecer en el mercado. El sector de alojamiento y hospedaje no es ajeno a ésta situación y ha venido implementando diversas estrategias que permiten lograr éste propósito, entre las más utilizadas las reseñas digitales para entender y comprender los sentimientos de sus clientes en la estadía de sus hoteles con el fin de lograr posicionamiento en el mercado, gestión de clientes, gestión de marketing y gestión de riesgos [1]. Otras han implementado modelos centrados en el cliente pero al mismo tiempo teniendo presente los principios y cultura organizacional de cada hotel por medio de marcos conceptuales para empezar en el proceso de la digitalización y mejorar la competitividad [2].

También, hay tendencias que se han enfocado en la implementación de la tecnología para la mejora de la interacción con los usuarios por medio de plataformas donde los clientes pueden contar sus experiencias, recomendaciones, opiniones y de esta manera hacer que la interacción sea mucho más personalizada tratando de cumplir siempre con sus necesidades y demostrando que la opinión de ellos posee bastante valor [3]. Además, la creación de las plataformas digitales, también ha resultado útil para los hoteles enfocarse en cinco factores importantes en los ejercicios de digitalización como lo son el perfil del cliente, repositorio de servicios, factores de contexto (tiempo, espacio, distancia), filtros y planificadores de viajes demostrando que la utilización de la gestión masiva de datos en red (big data) puede traer grandes beneficios a este sector [4].

En el contexto actual de la pandemia producto del Covid-19, la mayoría de los establecimientos hoteleros se han visto obligados a implementar de forma ágil metodologías de digitalización que apoyen su reactivación económica, las cuales constan de pruebas masivas, equipos de gestión de crisis enfocados en los clientes, protocolos, medidas saludables y procesos de vigilancia mediante la aplicación de tecnologías para brindar un mejor servicio en un contexto de bioseguridad que satisfaga en los clientes sus necesidades estructurales, cognitivas y relacionales [5].

En Colombia se han realizado diversos estudios en éste el sector enfocado a los directivos de éstos establecimientos donde los resultados presentan que los hoteles deben tener grupos participativos en sus empleados para promover la motivación. También, que las áreas del trabajo deben ser áreas de alojamiento, contabilidad, mantenimiento, alimentación, gestión humana, ventas y mercadeo. Además, debe tener capacitaciones de la aplicación de la tecnología para la mejora del hotel y por ultimo poseer un gran liderazgo para que el ambiente laboral sea exitoso [6].

Es reconocido que la implementación de la transformación digital trae muchos beneficios a una organización dentro de los cuales para el sector de alojamiento se han identificado cinco principales:

1. El primero de ellos se relaciona con el uso de plataformas de interacción donde se aprovecha la tecnología para desarrollar contenidos que ayuden a los usuarios a visualizar los productos y servicios ofrecidos como elemento persuasivo de venta externa pero también consolidando la cultura organizacional al posicionar la imagen y marca, promover la comunicación abierta entre colaboradores e impulsando a un dialogo constructivo [7].
2. En segundo lugar, permite la creación de un entendimiento compartido para abordar desafíos locales beneficiando a las comunidades con proyectos que apoyen a la transformación social en especial entre actores del mismo gremio [8].
3. En tercer lugar, promueve una cultura de servicio informado personalizado centrado en el cliente cumpliendo con las expectativas de su viaje ya que se enfoca en la personalidad de cada uno de ellos [9].
4. En cuarto lugar, mejora la gestión de las no conformidades derivadas del servicio, el seguimiento de los procesos y el control de estos [10]. Aunque, la adopción de tecnología promueve el uso de datos, hay que ser cautelosos con la intimidad de la información de los usuarios la cual está cada vez más protegida [11]. En este enfoque de procesos, con la actual pandemia del Covid-19, la tecnología es un apoyo para

el buen funcionamiento de las medidas de higiene y protección, reorganización interna de funciones y responsabilidades, la prestación de los servicios al reducir y especializar la interacción humana y el monitoreo de variables como el tiempo de espera del cliente en todos los puntos de contacto [12].

5. Finalmente el beneficio más apreciado por los administradores de éstos establecimientos es el comprender previamente las necesidades y expectativas de los consumidores turísticos en aspectos complejos como son experiencias memorables las cuales se estimulan con factores como las atracciones turísticas, motivaciones de viaje, intercambio cultural, interacción interpersonal, compañeros de viaje, planificación de viajes, grado de factores nuevos percibidos, emociones vividas, sueños y realización deseada [13] traducido todo en un pequeño paquete de información que sintetice el encontrar un establecimiento de alojamiento de muy buena calidad y que este al mejor precio [14] y de esta manera la calidad percibida será positiva.

En virtud de lo anterior, el presente estudio presenta una revisión de literatura para identificar las principales variables a considerar al momento de plantear un programa de transformación digital en el sector de alojamiento y hospedaje que sean asertivas basado en experiencias mundiales reportadas en la literatura científica

2. MÉTODO

El presente estudio se desarrolló bajo un protocolo de revisión sistemática consistente en dos fases las cuales la planeación de la revisión y el desarrollo de la revisión. En la planeación de la revisión se incluye la revisión de antecedentes, definición de la pregunta de investigación, definiciones de fuentes de información, definición de parámetros de inclusión y exclusión, definición de criterio de extracción y síntesis y selección del gestor bibliográfico.

Por otra parte, en el desarrollo de la revisión se incluye la construcción sistema de ecuaciones de búsqueda, la extracción bibliométrica, la integración en gestores bibliográficos, la depuración de referencias y el tamizaje de referencias.

2.1 Planeación de la revisión

2.1.1 Definición de fuentes de información

Se utilizó la base de datos académica Scopus® como fuente de información primaria y se realizó la ecuación de búsqueda que expresara de forma exacta los requerimientos de información para el objetivo del estudio. Aunque existe diversidad de bases de datos, se escogió Scopus® porque es una base de datos que tiene un gran grado de importancia internacional, además del análisis de comportamiento de acuerdo con las citas y de la afinidad que tiene esta base de datos con los criterios de estudio de esta investigación. Por otra parte, se hizo uso de literatura gris obtenida de Google Academic por la accesibilidad de búsqueda de documentos, trabajos de grados, conferencias y artículos referentes al objeto de estudio.

2.1.2 Definición de parámetros de inclusión y exclusión

Para la selección de los artículos de investigación se tuvieron en cuenta items relacionados con la identificación de términos, abreviaturas, sinónimos, palabras claves, y la búsqueda se basó en la coincidencia existente de las palabras que hacían parte de la ecuación de búsqueda en el título de los artículos que aparecían en la base de datos, y también se consideró el tamaño del resumen científico (abstract).

Se excluyeron artículos duplicados que poseen diferente nombre, pero el cuerpo es el mismo, artículos de menos de cuatro páginas, y se excluyeron artículos relacionados con transformación digital en otras actividades y sectores económicos, se acotaron únicamente al concepto o implementación en el sector turístico de alojamiento y hospedaje (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de inclusión y de exclusión

Parámetros de inclusión	Parámetros de exclusión
Año (2016- 2021)	Publicaciones duplicadas
Artículos, Conferencias y Documentos científicos	Artículos cortos (< 4 páginas)
Inglés y español	No referidos en el tema principal (Transformación digital)
Publicaciones	No hacen alusión a la implementación
Palabras claves: E-Commerce, Social Media, Tourism	Publicaciones alusivas a otras actividades o sectores económicos diferentes a turismo

2.1.3 Selección del gestor bibliográfico

Con el fin de organizar y sistematizar la información, así como poder organizar las colecciones de referencias en unidades lógicas secuenciales se debe seleccionar un gestor bibliográfico preferiblemente compatible con el editor de texto utilizado para la escritura científica. para el caso de nuestros estudios selecciona la herramienta Mendeley ®.

2.2 Desarrollo de la revisión

2.2.1 Extracción bibliométrica

Se realizó la extracción bibliométrica en el formato .ris para su importación del total de los artículos encontrados según la ecuación de búsqueda al gestor bibliográfico Mendeley ®.

Asimismo, de esta búsqueda en la base de datos de Scopus ® se realizó la coocurrencia mediante el software VOSviewer y el resultado fue el hallazgo de cuatro clústeres relacionados con factores del turismo, interacción con el cliente, industria hotelera y digitalización.

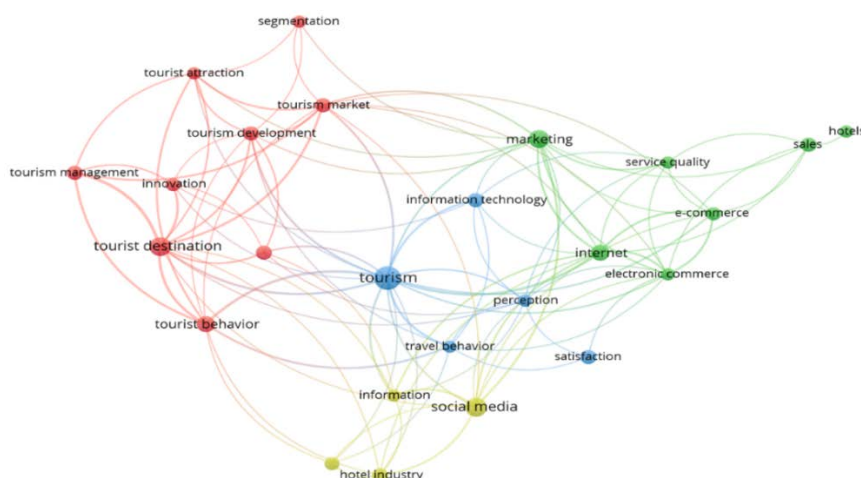


Figura 1. Coocurrencia Bibliográfica

2.2.2 Tamizaje de referencias

Se parte de una búsqueda general donde se incluyen las n referencias integradas de acuerdo a la ecuación de búsqueda, después se hace el tamizaje primario donde los elementos de análisis son el título y las palabras clave lo que representa un tamizaje entre el 60% y máximo el 70% de las referencias integradas, luego se realiza el tamizaje secundario donde el elemento de análisis es el resumen lo que representa un tamizaje entre el 30% y máximo el 50% de las referencias integradas y por último, se hace el tamizaje terciario donde el elemento de análisis es todo el documento lo que representa un tamizaje entre el 10% y máximo el 20% de las referencias integradas.

De acuerdo con lo anterior, con el fin de garantizar la uniformidad en la revisión de la literatura, se aplicará la declaración PRISMA como metodología estandarizada adaptada con el tamizaje anterior diligenciando los datos de la Figura 2.

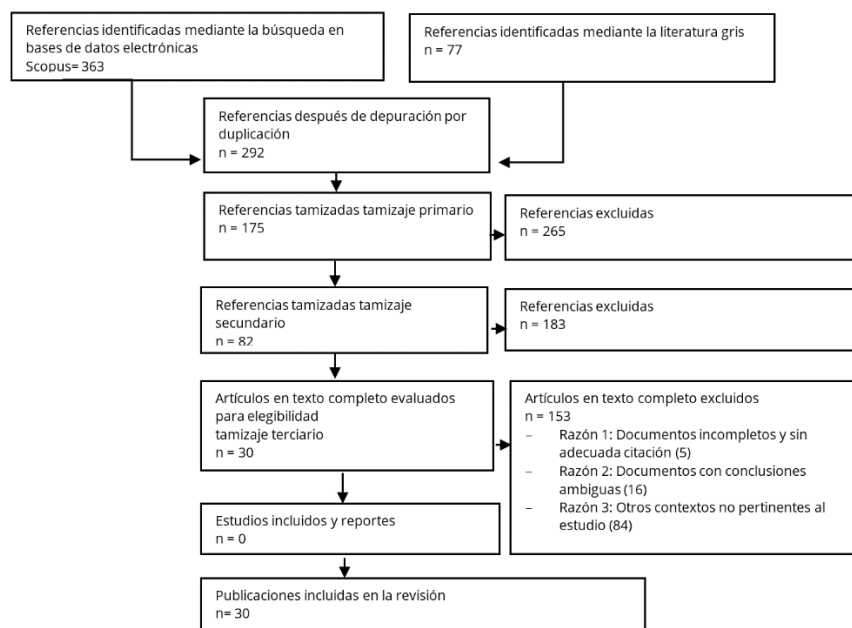


Figura 2. Adaptación del enfoque Prisma para revisiones sistemáticas

Una vez consultadas las bases de datos y aplicado los parámetros de inclusión y exclusión se obtuvieron 292 resultados, de acuerdo con los criterios de exclusión, se tamizaron a 82 artículos y de acuerdo a la información consignada en los resúmenes de los artículos, se seleccionaron 30, de los cuales de obtuvo alguna información para la construcción de la propuesta desde la revisión bibliográfica. Con los artículos seleccionados y los resultados obtenidos de las revisiones bibliográficas, la clasificación y comparación de la información, se desarrolló la lectura profunda y comparación sistemática

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Desafíos de la transformación digital

3.1.1 Desafío: Cambio en la cultura de los clientes

Debido a la aparición de las aplicaciones móviles, las empresas poseen el desafío de crear relaciones consistentes, personalizadas y apropiadas con los clientes turísticos brindando información más personalizada, importante y específica sobre el servicio que se va a prestar para lograr la participación del cliente cumpliendo con sus expectativas [15]. Por lo tanto, la propuesta de valor para él es sumamente importante para las empresas turísticas, porque de ella depende la razón por la cual el cliente prefiere a una empresa y no a la otra (Tabla 2).

Tabla 2. Desafíos de los cambios en la cultura de los clientes

Palabras clave	Cambios en la cultura de los clientes
Relaciones con los clientes	Relaciones consistentes, personalizadas y apropiadas con sus clientes
Turismo sostenible	Crecimiento continuo de un sector turístico más sostenible y responsable
Turismo responsable	
Propuesta de valor	Monetizar propuesta de valor para el cliente turístico
Redes sociales	Entendimiento del manejo de redes sociales en planificación de viajes
Sistema turístico	Diseñar un sistema turístico y un ecosistema relevante que pueda respaldar valores diversificados y variables
Gestión de datos	la implementación de las soluciones que brinden un alto nivel de seguridad en el proceso de gestión de datos.
Nuevas prioridades	Enfrentar nuevas prioridades y ventajas que trae el desarrollo tecnológico
Nuevas ventajas	
Beneficios socioeconómicos	Garantizar los beneficios socioeconómicos a todos los interesados de un turismo sostenible

Esta propuesta de valor brinda al usuario las experiencias que va a adquirir al comprar y usar el servicio, y, es por esta razón que otro desafío para las empresas es como lograr la monetización de la propuesta de

valor para el cliente y que de esta manera se pueda lograr la remodelación de productos y servicios, mejorar las capacidades de movilidad, aumentar la comunicación y acceder a la información [15]. Además, el desarrollo tecnológico va aumentando cada vez más, provocando que las empresas vayan generando estrategias para enfrentar las nuevas prioridades y ventajas de los nuevos consumidores por medio de la creación de nuevos espacios en el turismo online [16].

Por ejemplo, la participación de las redes sociales a la hora de elaborar un viaje ronda entre un 65% y 92% del total de los viajes debido a que más del 50% de las personas utilizan este medio para planificarlos, en especial, los jóvenes. Es por esta razón que las empresas tienen como desafío ver cómo se pueden entender las redes sociales y así hacer uso de ellas para aumentar la industria del turismo futura [17]. También, la reserva y compra online ha aumentado a lo largo del tiempo debido a la implementación de la digitalización de los servicios financieros de las empresas turísticas, lo que causa a los usuarios una preocupación sobre el manejo de sus datos personales y financieros. Por lo tanto, las empresas deben asegurar un proceso seguro que brinde un alto nivel de seguridad en el proceso de gestión de los datos de sus usuarios [18].

Por otra parte, de acuerdo con la organización mundial del turismo, uno de los desafíos más importantes de la transformación digital en el turismo es el crecimiento continuo de un sector turístico más sostenible y responsable que permita a las empresas de viajes mantenerse en el mercado brindando servicios innovadores [19]. Para la implementación de espacios de turismo sostenible se necesita garantizar los beneficios socioeconómicos a todos los interesados mediante puestos de empleo, oportunidades de ingresos y actividades sociales, lo que genera un gran desafío a las empresas de cómo asegurar la mayor oferta turística para los clientes teniendo en cuenta sus expectativas y necesidades pero al mismo tiempo generando la tendencia de cambio de comportamiento turísticos a un comportamiento turístico sostenible [20] ya que muchos de los turistas prefieren los valores de la experiencia que el precio-calidad a la hora de planificar un viaje.

Estos valores van desde las identidades culturales y sociales hasta peculiaridades sectoriales que coincidan y satisfagan sus valores personales. Así que, por último, las empresas deben lograr el diseño de un sistema turístico y un ecosistema relevante que pueda respaldar los valores diversificados y variables de sus clientes mediante la vinculación de la post-satisfacción de los clientes [21].

3.1.2 Desafío: Cambios de cultura de los SMES turísticos

El principal desafío de las empresas turísticas para lograr un flujo de efectivo positivo es la capacidad de crear un modelo de negocio capaz de involucrar a los clientes con un nuevo desarrollo de servicios por medio de la inteligencia social y el marketing one-to-one (Tabla 3), es decir, el trabajo en línea con el cliente a través de las plataformas digitales [17]. Sin embargo, las pymes se caracterizan por ser empresas pequeñas y conservadoras, es por esto por lo que otro de los desafíos es enfrentar su naturaleza y generar inversión en digitalización e innovación para la adopción de nuevas tecnologías. Esto depende de los empresarios debido a que muchos de ellos poseen falta de seguridad, experiencia y habilidades informáticas para implementar un entorno digital [22].

Tabla 3. Desafíos de los cambios en la cultura de los SMES turísticos

Palabras clave	Cambios en la cultura de los SMES turísticos
Modelo de negocio	Capacidad de crear un modelo de negocio capaz de involucrar a los clientes con un nuevo desarrollo de servicios
Modelo tradicional	Seguir siendo líderes del sector turístico y conseguir cambiar el modelo tradicional a un entorno transformado digitalmente
Desconocimiento	Desconocimiento de la implementación de la transformación digital
Turismo PYME	Naturaleza del turismo PYME: pequeña y conservadora
Brecha digital	la brecha de conocimiento de la digitalización por parte de las PYMES
Ventaja competitiva	Identificar los requisitos comerciales para una ventaja competitiva
Operadores tradicionales	Operadores tradicionales y nivel de digitalización
Toma de decisiones	Creación de modelos para la toma de decisiones rápida
Tendencias tecnológicas	Comprender las tendencias tecnológicas para innovar y reinventar sus servicios hacia los clientes.
Ritmo de crecimiento tecnológico	Mantener el ritmo del rápido cambio en las tecnologías digitales disponibles

También, poseen desconocimiento de la transformación digital, falta de comprensión, disposición de pasar de un entorno tradicional financiero a un entorno digital financiero y desarrollar la ética, cultura y la reputación digital [23]. Por lo tanto, la brecha de conocimiento es un factor de las pymes que no permite el funcionamiento de una mentalidad digital ya que en la mayoría de ellas no se poseen conocimientos básicos que permiten la comprensión de las tecnologías digitales y tampoco conocimientos estratégicos que permiten la inversión de dinero y tiempo para lograr la digitalización. Además, el constante avance tecnológico y digital hace que las pymes no sepan que tecnologías adoptar en sus negocios debido a la gran variedad, obstaculizando la adopción digital [22].

Por otra parte, las empresas necesitan remodelar su modelo operativo para generar mayores ingresos, menores costos y experiencias inolvidables para sus clientes, pero el gran desafío aquí es como identificar los requisitos comerciales para una ventaja competitiva que genere fascinación en los clientes [15]. Pero, cambiar el modelo tradicional significa la construcción de un nuevo ecosistema capaz de brindar soluciones, pensar en el bienestar del cliente y tener en cuenta su opinión por medio de las herramientas que brinda la transformación digital [24]. Es decir, que las prácticas tradicionales empresariales, bajos niveles de digitalización en las operaciones internas de los hoteles y una nueva creación de valor para los clientes son otros de los desafíos que poseen las empresas de operadores tradicionales [25].

Asimismo, las empresas deben crear modelos para la toma de decisiones rápida automatizados para que la experiencia del cliente sea calidad y amigable en el proceso de adquirir un servicio o producto turístico [26]. También, adaptar las herramientas digitales para cambiar la cultura y satisfacer las necesidades y los cambios de comportamiento de los clientes a través del análisis de datos. Es por esta razón que el desafío para ellas es comprender las tendencias tecnológicas para innovar y reinventar sus servicios hacia los clientes y crear un modelo digital eficaz para la mejora de la relación con el consumidor [27] y mantener el ritmo del rápido cambio en las tecnologías digitales disponibles en las pymes [28].

3.1.3 Desafío: Cambios en las políticas de estado hacia las SMES turísticas

El hecho de que las PYMES no puedan aprovechar e implementar las herramientas de la transformación digital no solo depende de ellas sino también de la voluntad de los gobiernos para invertir en innovación y crear destinos turísticos inteligentes (Tabla 4). Es por esto por lo que uno de los desafíos es generar que los entes del estado apoyen con financiación a las empresas para que puedan mejorar la capacidad de adopción de tecnologías y lograr un destino inteligente visibilizando el turismo inteligente [22]. Además, la infraestructura inteligente, la utilización de recursos de información y el desarrollo de la industria de inteligencia es otro de los desafíos importantes que deben enfrentar las empresas porque son los componentes esenciales para el buen desarrollo de una destino inteligente y creaciones de aplicaciones que fomenten la transformación integral de la industria del turismo [29].

Tabla 4. Desafíos de los cambios en las políticas de estado hacia las SMES turísticas

Palabras clave	Cambios en las políticas de estado hacia las SMES turísticas
Política	La voluntad política para la transformación digital de las SMEs en distintos países
Infraestructura inteligente	Infraestructura Inteligente, Utilización de recursos de información y desarrollo de la industria de inteligencia
Regulación legal	Regulación legal eficiente para general la relación entre un espacio virtual y el turismo digital
Conocimiento	Difusión de conocimiento para aplicar las tecnologías que generen un entorno seguro
Información turística	Construcción de información turística para la creación de herramientas digitales
Estrategias digitales	Estrategias de digitalización enfocadas en competencias laborales y habilidades digitales
Gestión turística	Entorno de gestión turística para la reducción de costos y aumento de productividad digital

Sin embargo, la difusión de conocimiento para aplicar las tecnologías que generen un servicio seguro de calidad es otro desafío que presentan ellas ya que no poseen la infraestructura necesaria y para esto necesitan grandes inversiones. De esta manera se generaría un entorno seguro para los clientes [30]. Pero, la relación que existe entre un espacio virtual y el turismo para generar un entorno seguro debe poseer una regulación legal eficiente donde se garantice los derechos de los clientes del manejo de información. Es por esta razón que el generar una regulación legal de calidad que aplique herramientas enfocadas al cliente es uno de los desafíos que presentan la mayoría de las empresas turísticas [31].

Por otra parte, la tecnología de la información se está desarrollando de una manera exponencial pero la construcción de esta información no va en el mismo sentido de crecimiento. Las empresas deben generar información espacial que sea realista e interactiva para que los clientes puedan observar los rasgos y características especiales de los sitios turísticos [32]. Por lo tanto, las estrategias de digitalización no solo van enfocadas a la digitalización turística sino también a la digitalización de la competencia profesional, competencia laboral, marketing, uso del big data y diseño espacial entre otras que hacen que las empresas tengan el desafío de cumplir con todas ellas y al mismo tiempo transformar las empresas para que dejen de ser burocráticas y se creen empresas emergentes [33]. De esta manera, la digitalización permite la reducción de costos mediante procedimientos para establecerse en el mercado. Por lo tanto, el desafío final para la empresa es crear una dinámica que permita el uso de técnicas digitales para mantenerse en el mercado con un menor costo, pero mayor productividad [34].

3.1.4 Desafío: Tecnologías emergentes

El turismo inteligente incluye las visiones inteligentes, alto nivel de innovación y cadenas de valor globales [25] que se convierten en desafíos empresariales (Tabla 5). Para implementar este turismo existen otros desafíos como lo son la falta de legislaciones vigentes, el miedo, falta de consciencia, falta de financiación, pero sobre todo falta de cooperación entre las partes y gobiernos involucrados [35]. Con la transformación de web 2.0 a 3.0 los motores de búsqueda y agentes de software van a comprender de una manera más realista lo que los usuarios buscan y necesitan.

Tabla 5. Desafíos de las tecnologías emergentes

Palabras clave	Tecnologías emergentes
Turismo inteligente	Turismo inteligente, visión inteligente y cadenas de valor globales
Web 3.0	La transformación de Web2.0 a Web3.0
Bot Agents	Análisis de los datos recibidos de Bot Agents
Aplicaciones	Disponibilidad de las aplicaciones en todo momento y la continuidad del negocio
Marketing digital	Tecnología creciente en el marketing digital
Negocios electrónicos	Negocios electrónicos a través de tiendas online
Comercio electrónico	Comercio electrónico y transacciones B2B y C2C
Alta tecnología	sistema de simulación asistido por ordenador de alta tecnología.
Chatbots	Uso de chatbots en turismo y hospitalidad
Marketing digital	Nuevo modelo de prestación de servicios por medio del marketing digital
Trabajo 4.0	Trabajo 4.0: Trabajo intelectual innovador
Conocimiento artificial	Avances tecnológicos a través del conocimiento artificial
Procesos digitales	Recursos para las personas, sistemas y procesos digitales
Comercio electrónico	Desafíos del comercio electrónico
Turismo digital	Desafíos del turismo digital
Aplicaciones de viajes	Mejorar la saturación de las aplicaciones de viajes.

Es por esto por lo que este desafío es tan importante para las empresas debido a que deben invertir en innovación y desarrollo logrando la anticipación de las necesidades de los usuarios con la implementación de la web 3.0 en los sectores turísticos [17]. Pero involucra otro de los desafíos que es el análisis de la big data de las redes sociales a través de los bot agents porque la implementación de este servicio generaría muchos más datos que son importante para las empresas ya que estos agentes interactúan todo el tiempo con los clientes durante la estadía siempre dispuesto a ayudar y a responder la duda que ellos tengan. así se genera y se brinda una mejor y más íntima experiencia al cliente [17].

Por esta razón, la implementación de chatbots en redes sociales, de servicio al cliente y con inteligencia artificial también son desafíos para estas [36]. Sin embargo, estos no son los únicos desafíos que tienen gracias a la aparición de tecnologías emergentes, sino que la implicación de la transformación digital también necesita la implementación del negocio electrónico debe ser dada por las empresas como un reto ya que las operaciones internas son más eficaces cuando se hacen a través de tiendas online y marketing digital [25]. Este incluye el comercio electrónico que trae consigo grandes desafíos para las empresas turísticas como el establecimiento de las transacciones B2B, C2C, innovaciones en las cadenas de suministros y aumento de intermediarios [25]. Para implementar este comercio existen otros desafíos como lo son la falta de inversión, falta de participación, falta de conocimiento, falta de la toma de decisiones

rápida, pero sobre todo la falta de que todas las personas y actores de la ejecución del turismo inteligente tengan un enfoque tecnológico [35]. Pero, enfrentar a la saturación de los mercados de aplicaciones de viajes es otro de los desafíos de las empresas ya que no existe un nicho libre para poder crear e innovar en otra aplicación posible. Pero estas empresas deben generar estrategias mediante asistentes digitales para combatir y mejorar la saturación de estas aplicaciones [37].

De acuerdo con lo anterior, las empresas deben aplicar estrategias para simplificar lo complejo que es el entorno digital, que sean más eficientes y que se generen nuevas ventajas competitivas. Es por esto por lo que uno de los desafíos es encontrar y establecer la disponibilidad de las aplicaciones en todo momento y la continuidad del negocio [38]. Además, adquirir conocimiento para manejar las capacidades de las tecnologías digitales se ha vuelto un desafío para las compañías ya que el manejo de esta tecnología creciente en el marketing digital se ha vuelto esencial para la implementación y buen desarrollo de la transformación digital [39]. Es por esta razón que deben aceptar el reto de la creación un nuevo modelo de prestación de servicios con nuevas tecnologías de marketing online [38].

Por ejemplo, la simulación de sistemas asistidos por ordenadores de alta tecnología es uno de los desafíos más grandes de las empresas por la cantidad de habilidades y conocimientos que se incluyen a la hora de generar la realidad virtual mediante gráficos por medio de inteligencia artificial, simuladores [40] y herramientas de creación basadas en conocimiento artificial [41]. Para esto necesitan, nuevos requisitos para que estas afronten en el manejo y formación de personal con un trabajo intelectual creativo y un alto nivel de movilidad de trabajadores [42] que generen una relación entre las personas, los sistemas y los procesos ya que es de gran importancia, aunque se convierte en un gran desafío para las empresas a la hora de transformar un destino en un destino inteligente [43].

3.2 Barreras de la transformación digital

3.2.1 Barrera: Visión estratégica y modelo organizacional

Una de las principales barreras de la implementación es la estructura organizativa rígida y jerarquizada de las empresas, porque esto no permite que puedan enfrentarse correctamente a los desafíos estratégicos (Tabla 6), ni a la utilización de redes sociales y no permite la generación de nuevos modelos de gestión empresarial y canales de comunicación para ofrecerle al cliente una experiencia renovada y futura [38].

Tabla 6. Barreras de la visión estratégica y modelos organizacionales

Palabras clave	Visión estratégica y modelo organizacional
Estructuras organizativas	Estructuras organizativas demasiado rígidas y jerarquizadas
Visión estratégica	Falta de visión estratégica por parte de los directivos de las empresas turísticas
Sistemas empresariales	Aperturas en las actividades, sistemas y procesos de la empresa a la innovación
Empresas no innovadoras	Sector turístico con resistencia al cambio por parte de las empresas menos innovadoras
Mala administración	Mala administración de procesos automatizados
Cultura	Culturas con barreras sociales, financieras y tecnológicas
Falta de liderazgo	Falta de liderazgo administrativo para una política turística
Malentendido en procesos	Malentendido de los procesos de la digitalización
Modelo empresarial tradicional	Modelo empresarial tradicional con desconocimiento en ventajas y desventajas de la digitalización

Esto se une a que los directivos de las empresas poseen falta de visión estratégica y no consideran que las redes sociales sea una herramienta de negocio provocando que las opiniones de los clientes que se dan por este medio no sean tomadas en cuenta para la mejora de sus negocios [38]. Es por esta razón que el hecho de que las empresas sean menos innovadoras generar que exista resistencia al cambio y no permite [38] que abran sus actividades, sistemas y procesos a la innovación ni a la creación de nuevas ideas para el negocio [25]. Además, no permite la mejora de la administración convirtiéndose en una barrera el hecho de no tener mentalidad abierta para elaborar estrategias que mejoren el servicio para los clientes por medio de procesos automatizados [33].

Por otra parte, la cultura donde residen cada una de las empresas turísticas también es una barrera debido a que algunas culturas por su ámbito social y también su manera de financiación no permiten un cambio

de experiencia turística ni tampoco cambiar los medios en que las empresas comunican y hacen negocios con sus clientes [41]. Pero eso también es afectado por la falta de liderazgo administrativo que tienen las empresas para crear una política turística digital junto con el sector público generando que sea compleja la unificación de políticas para lograr una economía colaborativa [24].

Esto produce que las empresas se generen más barreras como el malentendido de los procesos que se llevan a cabo para la digitalización, no entendiendo que las personas, los ciudadanos, los medios digitales y las actividades educativas son los principales actores de participación para lograrlo [23] y para acabar con la barrera del modelo empresarial tradicional junto con su desconocimiento de las ventajas y desventajas de la transformación digital [27].

3.2.2 Barrera: Conocimiento digital

La falta de talento y conocimiento de habilidades digitales dentro de las organizaciones en una de las más importantes barreras que existen surgiendo precisamente por la falta de capacitación del personal, los bajos salarios y la contratación temporal (Tabla 7). Además de que el orden investigativo y de educación no está muy alineado con el sector turístico, lo que produce el no avance digital [38].

Tabla 7. Barreras del conocimiento digital

Palabras clave	Conocimiento digital
Habilidades digitales	Falta de talento y conocimiento en habilidades digitales dentro de las organizaciones
Desconocimiento	Desconocimiento de los beneficios y ventajas de la digitalización
Dominio tecnológico	Dominio de la tecnología en herramientas de marketing digital
Capacidad tecnológica	Capacidad tecnológica y capital humano limitado
Brecha digital	Brecha de digitalización en oferta de proveedores digitales
Educación insuficiente	Habilidades, formación y educación digital insuficiente
Recursos humanos	falta de recursos (humanos) en el desarrollo de la tecnología digital
Infraestructura	Infraestructura tecnológica para el desarrollo del entorno turístico digital
Especialistas	Malentendido de la necesidad de aumentar el número de especialistas en TI

Es por esta razón que el desconocimiento de los beneficios y ventajas de la digitalización es una de las barreras para avanzar en la tecnología y aumentar el uso de la digitalización junto con aplicaciones móviles que cubra la demanda del turismo digital. Al no conocer estos dos aspectos para las empresas, el implementar la tecnología es un gasto y no una inversión [38].

También, esta barrera está relacionada con la barrera del dominio de la tecnología debido a que los empresarios no conocen como manejar las herramientas de marketing digital provocando que el turismo rural no sea conocido electrónicamente y se pierda la gran oferta que produce por la baja demanda de consumidores turísticos [39]. Sin embargo, también existen pocas ofertas y proveedores de digitalización acorde con las necesidades de las empresas, es por esto por lo que ellas se estancan en su implementación y no pueden estar digitalizadas completamente [15].

Por otra parte, el manejo de la economía digital junto con los medios de comunicación como las redes sociales, los sitios web y los correos electrónicos demandan mucho personal que posea habilidades en marketing digital que es algo que aún no se tiene para satisfacer los procesos de digitalización [18]. Pero, existe un malentendido de la necesidad de aumentar el número de especialistas en TI ya que las empresas lo que están haciendo es buscar desde 0 personas que tengan habilidades digitales, pero no buscan capacitar al personal que tienen en estas habilidades y explotarlas, lo que causa que esto sea una barrera para la ejecución de un plan de transformación digital [23].

Es decir, las habilidades, la formación y la educación insuficiente son otras barreras por la escasez de estos tres aspectos enfocados en la digitalización [34]. Por lo tanto, es importante recalcar que no solo el límite del capital humano es una barrera sino también el límite de la capacidad tecnológica debido a la falta de tecnología para el análisis de datos que conlleva un turismo inteligente generando como consecuencia el no desarrollo de los sectores inteligentes [43]. Asimismo, provoca otras barreras como lo son la infraestructura tecnológica, el entorno legislativo y el clima empresarial que afectan el desarrollo de una industria turística digital [35].

3.2.3 Barrera: Situaciones sectoriales

En el mercado actual existen grandes conglomerados de hoteles que están totalmente automatizados lo que genera una barrera para las pymes con su reducida dimensión por el sector competitivo que estos agentes poseen [18]. Una de las causas es que no existe apoyo del sector público o de los gobiernos para la transformación digital es las pymes ocasionando que una de las barreras para la innovación digital es la falta de instrumentos de financiación de los gobiernos e entidades públicas de los sectores que puede ser causado por la legislación de estos lugares que no favorecen el desarrollo y aumento de innovación [38]. Por lo tanto, la incertidumbre regulatoria ante los nuevos modelos de negocio es otra de las barreras ya que es necesaria una política regulatoria que permita el desarrollo e incremente la digitalización en los sectores junto con la compatibilidad de los negocios que se presentan en ese mercado [38] (Tabla 5).

Tabla 8. Barreras de las situaciones sectoriales

Palabras clave	Situaciones sectoriales
Automatización	Sector muy atomizado y competitivo con grandes agentes internacionales
No financiación	Dificultad de financiación para innovación digital
Infraestructura	Deficiencias estructurales en cuanto a infraestructuras TIC en el sector
Incertidumbre regulatoria	Incertidumbre regulatoria ante los nuevos modelos de negocio
Turismo no organizado	Turismo no organizado en contra de la digitalización

Hay que tener en cuenta que muchos de estos sectores no poseen disponibilidad ni equipamiento para conectarse a internet en sectores rurales turísticos. Es por esta razón que se vuelve en una barrera para que se conozca acerca de la digitalización, inteligencia artificial, marketing, redes, big data, inteligencia de negocios, entre otros que ayudan a sus economías.

Además, que muchas de ellas al ser pymes no constan de una estructura organizativa [38] y que están amenazadas por el turismo no organizado en contra de la digitalización propone que se planifiquen viajes sin ninguna agencia de viajes y el consumidor se encargue de la elaboración de la ruta y sitios a los cuales va a visitar. Esta es una barrera para que las empresas turísticas puedan acceder a los consumidores turísticos porque no hay ningún medio digital que les muestre la propuesta de valor de sus establecimientos y negocios [26].

4. CONCLUSIONES

La transformación digital de un sector empresarial puede ser un desafío estructural para un gremio, sector o Estado. En el caso del sector de alojamiento y hospedaje dada la heterogeneidad de las variables involucradas. Los principales desafíos entendidos se centran en el modo de relacionamiento con los clientes hacia la consistencia y personalización además de promover una cultura de sostenibilidad y el uso intensivo de redes sociales como mecanismo no solo de promoción sino de inserción en un ecosistema digital complemento al físico y ambiental ligado a la automatización de procesos relacionados con el viaje seguro.

Esto va ligado a un cambio cultural de los operadores de éstos servicios especialmente en la formación de cultura digital y la construcción de modelos rápidos de decisión y adaptativo que presenten tesis de negocio eficientes y atractivas, para lo cual se deben promover regulaciones eficientes que faciliten el intercambio de información y recursos, la exhibición de información turística relacionada y especialmente diseñar estrategias de digitalización locales escalables con infraestructura de soporte para nuevas tecnologías como es el mercadeo digital, las relaciones entre actores de la cadena de servicio

Las principales barreras identificadas para que éstos desafíos sean un derrotero sectorial y estatal identificadas son las actuales estructuras empresariales tradicionales de éstos establecimientos resistentes a los cambios con bajos esquemas de liderazgo y modelos de negocio tradicionales con bajo conocimiento de la cultura digital en aspectos tecnológicos y organizacionales en sectores con negocios altamente atomizados donde nuevos agentes internacionales con capacidad tecnológica están llegando a imponer reglas de juego en ventaja en ecosistemas empresariales no organizados y con regulaciones difusas e inestables.

En un contexto local, en Colombia la reactivación económica en el sector turismo depende en gran medida de los establecimientos de alojamiento y hospedaje que desde una visión integradora, integren servicios turísticos en plataformas de interacción digital diseñadas para las necesidades de éstos nuevos clientes digitales con necesidades dinámicas y centradas en el valor y la emotividad. Éstas nuevas plataformas de integración y cooperación deben referir a conceptos más allá de alojamiento tradicional hacia la experiencia integral del viaje en contextos de bioseguridad que presenten la información de forma confiable, abierta y segura.

El marco legal que permite estos propósitos se ha establecido en la ley 2068 de 2020 que incorpora el concepto de "plataforma digital" como el eje de los planes de viaje basados en servicios turísticos la cual será promovida y regulada por el Estado. Sin embargo, el reto es su implementación asertiva desde un contexto local que reconozca la identidad de cada territorio y le permita a su vez insertarse en un ecosistema digital global donde actores con alta capacidad tecnológica pueden ejercer posición dominante e imponer condiciones de servicio que limiten el desarrollo endógeno de éstos territorios con soberanía digital y social

REFERENCIAS

- [1] C. A. Martín, J. M. Torres, R. M. Aguilar, and S. Diaz, "Using deep learning to predict sentiments: Case study in tourism," *Complexity*, vol. 2018, 2018.
- [2] D. Forero, E. Salgado, and J. L. Villa, "Implementation model of Digital Transformation projects in Boutique Hotels | Modelo de implementación de proyectos de Transformación Digital en Hoteles Boutique," 2020.
- [3] I. Bueno, R. A. Carrasco, C. Porcel, G. Kou, and E. Herrera-Viedma, "A linguistic multi-criteria decision making methodology for the evaluation of tourist services considering customer opinion value," *Appl. Soft Comput.*, vol. 101, p. 107045, Mar. 2021.
- [4] K. Al Fararni, F. Nafis, B. Aghoutane, A. Yahyaouy, J. Riffi, and A. Sabri, "Hybrid recommender system for tourism based on big data and AI: A conceptual framework," *Big Data Min. Anal.*, vol. 4, no. 1, pp. 47–55, 2021.
- [5] R. Robina-Ramírez, J.-A. Medina-Merodio, L. Moreno-Luna, H. V Jiménez-Naranjo, and M. Sánchez-Oro, "Safety and Health Measures for COVID-19 Transition Period in the Hotel Industry in Spain," 2021.
- [6] P. Moya, N. Cortés, and A. Martínez, "The process of decision making in mipymes hoteleras in Boyaca, Colombia," *Rev.investig.desarro.innov.*, 9 (2), pp. 237–248, 2019.
- [7] M. Fenwick, J. A. McCahery, and E. P. M. Vermeulen, "The End of 'Corporate' Governance: Hello 'Platform' Governance," *Eur. Bus. Organ. Law Rev.*, vol. 20, no. 1, pp. 171–199, 2019.
- [8] M. T. Jørgensen, A. V. Hansen, F. Sørensen, L. Fuglsang, J. Sundbo, and J. F. Jensen, "Collective tourism social entrepreneurship: A means for community mobilization and social transformation," *Ann. Tour. Res.*, vol. 88, p. 103171, May 2021.
- [9] H. Shin, R. R. Perdue, and J. Kang, "Front desk technology innovation in hotels: A managerial perspective," *Tour. Manag.*, vol. 74, pp. 310–318, Oct. 2019.
- [10] M. Beatriz, G. Lara, and W. M. Lopesierra, "Análisis del nivel de madurez del sistema de gestión en empresas del sector hotelero Resumen Palabras clave," pp. 1–15, 2021.
- [11] M. Krafft *et al.*, "Insight is power: Understanding the terms of the consumer-firm data exchange," *J. Retail.*, Nov. 2020.
- [12] A. Bonfanti, V. Vigolo, and G. Yfantidou, "The impact of the Covid-19 pandemic on customer experience design: The hotel managers' perspective," *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 94, p. 102871, Apr. 2021.
- [13] M. de F. Coelho, M. de S. Gosling, and A. S. A. de Almeida, "Tourism experiences: Core processes of memorable trips," *J. Hosp. Tour. Manag.*, vol. 37, pp. 11–22, Dec. 2018.
- [14] G. Sánchez-González and A. M. González-Fernández, "The Influence of Quality on eWOM: A Digital Transformation in Hotel Management," *Front. Psychol.*, vol. 11, 2021.
- [15] Shoab Imtiaz and 김동진, "Digital Transformation: Development of New Business Models in the Tourism Industry," *Culin. Sci. Hosp. Res.*, vol. 25, no. 4, pp. 91–101, 2019.
- [16] M. Zsarnoczky, "The Digital Future of the Tourism & Hospitality Industry By Martin Zsarnoczky Spring 2018," *Bost. Hosp. Rev.*, vol. Spring, pp. 1–9, 2018.
- [17] R. Ribeiro and T. Florentino, "Digital transformation in tourism: A high level analysis of the impact that social networks and mass collaboration concept is having at tourism service providers," *7th Int. Conf. Cine. Tour. - ICCT*, no. October, pp. 1–9, 2016.
- [18] G. Petković, R. Pindžo, and M. Agić-Molnar, "Digital economy and (non) incremental changes in tourism and retail business model," *Ekonom. Preduz.*, vol. 66, no. 1–2, pp. 151–165, 2018.
- [19] J. Risteska, "the Digital Transformation Process and Future Trends in Tourism Sector," *Knowl. Int. J.*, vol. 41, pp. 249–254, 2020.

- [20] B. Hysa, A. Karasek, and I. Zdonek, "Social media usage by different generations as a tool for sustainable tourism marketing in society 5.0 idea," *Sustain.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–27, 2021.
- [21] C. Lim, N. Mostafa, and J. Park, "Digital omotenashi: Toward a smart tourism design systems," *Sustain.*, vol. 9, no. 12, 2017.
- [22] E. S. Popescu, "The Digital Transformation of Tourism SMEs in the European Union: Challenges, Opportunities, and Support," *Projekter.Aau.Dk*, Recuperado: https://projekter.aau.dk/projekter/files/306181233/European_Tourism_SMEs_in_a_Digital_Context.pdf
- [23] E. A. Khitskov, S. V. Veretkhina, A. V. Medvedeva, O. L. Mnatsakanyan, E. G. Shmakova, and A. Kotenev, "Digital transformation of society: Problems entering in the digital economy," *Eurasian J. Anal. Chem.*, vol. 12, no. 5, pp. 855–873, 2017.
- [24] F. Orange, "La transformación digital en el sector turístico," p. 55, 2016, Recuperado: http://www.fundacionorange.es/wp-content/uploads/2016/05/eE_La_transformacion_digital_del_sector_turistico.pdf
- [25] C. Panagiota, "Digital Transformation in tourism sector," no. October, p. 79, 2017.
- [26] T. Maslova, N. Pletneva, A. Althonayan, E. Tarasova, and A. Krasnov, "Transformation of consumer behavior in the tourism industry in the conditions of digital economy," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 940, no. 1, 2020.
- [27] A. A. Pacheco Pumaleque, I. Robles Fernandez, D. D. Isuiza Perez, and M. A. Añaños Bedriñana, "Digital transformation model for the development of tourism companies," *3C Empres. Investig. y Pensam. crítico*, pp. 47–61, 2021.
- [28] E. & P. Dredge, D., Phi, G., Mahadevan, R., Meehan, "Digitalisation in Tourism: In-depth Analysis of Challenges and Opportunities.," *Virtual Tour. Obs.*, p. 35, 2018.
- [29] Y. Guo, "The embedding convergence of smart cities and tourism internet of things in China: An advance perspective," *Adv. Hosp. Tour. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 54–69, 2014.
- [30] M. Sheresheva, M. Efremova, L. Valitova, A. Polukhina, and G. Laptev, "Russian tourism enterprises' marketing innovations to meet the Covid-19 challenges," *Sustain.*, vol. 13, no. 7, 2021.
- [31] S. Mambetova, M. Ayaganova, A. Kalykov, A. Akhmetova, and Z. Yeskerova, "Digital economy in tourism and hospitality industry," *J. Environ. Manag. Tour.*, vol. 11, no. 8, pp. 2006–2019, 2020.
- [32] L. X. Pan, "The application of virtual reality technology to digital tourism systems," *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 18, pp. 2.1-2.5, 2016.
- [33] E. Happ and Z. Ivancsó-Horváth, "Digital Tourism Is The Challenge Of Future," *Knowl. Horizons - Econ.*, vol. No 2, no. 2, pp. 9–16, 2018.
- [34] S. Papadakis and K. Tsakirakis, *The digital transformation of the tourism industry. The case of Thessaloniki online presence*, no. November. 2019.
- [35] N. Haifa Hammoud Al-Shammari, "The Reality Of Using Digital Technology On The Development Of E-Tourism In The Kingdom Of Saudi Arabia," *Multicult. Educ.*, vol. 6, no. 5, pp. 22–6, 2021.
- [36] S. Zlatanov and J. Popesku, "Current Applications of Artificial Intelligence in Tourism and Hospitality," pp. 84–90, 2019.
- [37] S. Bozhuk, N. Pletneva, T. Maslova, and K. Evdokimov, "Problems of transformation in the tourism industry in the digital economy," *SHS Web Conf.*, vol. 73, p. 01003, 2020.
- [38] T. Domínguez Vila *et al.*, "La Transformación Digital En El Sector Turístico," *Vivat Acad.*, vol. 0, no. June, pp. 1–20, 2014.
- [39] S. Sukaris, B. Prestyadi, and A. Kusani, "Transformation Of Information Technology Capacity As A Marketing Media Of The 'Lontar Sewu' Tourism Village, Hendrosari Village, Gresik Regency," *Kontribusi (Research Dissem. Community Dev.*, vol. 3, no. 1, p. 265, 2020.
- [40] C. Yoo, S. Kwon, H. Na, and B. Chang, "Factors affecting the adoption of gamified smart tourism applications: An integrative approach," *Sustain.*, vol. 9, no. 12, pp. 1–21, 2017.
- [41] M. Suyunchaliyeva, N. Shedenova, B. Kazbekov, and S. Akhmetkaliyeva, "Digital Economy: Information Technology and Trends in Tourism," *E3S Web Conf.*, vol. 159, 2020.
- [42] M. Morozov and N. Morozova, "Innovative Staff Training Strategies for the Tourism and Hospitality Industry," vol. 110, no. Emle, pp. 393–396, 2020.
- [43] M. S. Khan, M. Woo, K. Nam, and P. K. Chathoth, "Smart city and smart tourism: A case of Dubai," *Sustain.*, vol. 9, no. 12, 2017.

Los ovoproductos como oportunidad de innovación en el sector avícola

Angie Carolina Galindo Mora¹

Yamile Adriana Jaime Arias²

Universidad de La Salle

Colombia

El huevo es un alimento reconocido a nivel mundial por su valor nutritivo y su estructura diferencial que lo protege de la contaminación exterior. Además, es un alimento esencial en los hogares latinoamericanos y en industrias por su aporte nutritivo, excelente calidad y bajo precio. Sin embargo, el huevo es vulnerable a algunas enfermedades que pueden llegar a generar toxoinfecciones, lo que evidencia la necesidad de un avance tecnológico para su control. A través de los años los países desarrollados han innovado con tecnologías de conservación, tales como la congelación o la deshidratación para cumplir con las demandas de alimentos requeridas. Esto dio origen en 1950 a los ovoproductos, *productos obtenidos a partir de huevo, de sus diferentes componentes o sus mezclas, que están destinados al consumo humano directo, para la fabricación de alimentos o como insumos o materias primas para la industria, sometidos a procesos tecnológicos tales como la pasteurización, ultra-pasteurización, concentración, deshidratación o coagulación.* Se generó así una nueva economía por medio de este novedoso producto que se empieza a dar a conocer a nivel mundial para 1990, un mercado en el que Colombia participa a través de la Federación Nacional de Avicultores FENAVI. A nivel mundial los ovoproductos han llegado a gran parte del mercado convirtiéndose en una alternativa para las industrias, porque disminuyen espacio, costos y tiempos de producción en alimentos procesados, traen con sí un desarrollo importante y abren nuevos mercados. En Colombia se ha avanzado poco a poco mediante diferentes industrias nacionales y con fortalezas en tecnología con el fin de integrarse a nivel mundial en este desarrollo innovador. Por lo anterior, y dado el crecimiento de la economía del huevo y derivados como los ovoproductos, es importante desarrollar un estudio económico en el sector avícola colombiano y cómo está enfrentando este nuevo mercado, sus amenazas y oportunidades.

¹ Estudiante de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Alimentos.

Contacto: agalindo45@unisalle.edu.co

² Ingeniera de Sistemas y Computación, Magíster en Sistemas y Computación con énfasis en minería de datos.

Contacto: yajaime@unisalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación FAO ha propuesto tres objetivos principales a ser cumplidos para el 2050: La seguridad alimentaria, la prevención de degradación ambiental y las estrategias para afrontar el cambio climático.

A nivel mundial la seguridad alimentaria es esencial para un buen desarrollo tanto físico como emocional de las personas, lo que requiere de ciertas condiciones en los alimentos para garantizar: tener comida disponible, que haya manera de conseguirla, que estos alimentos sean suficientes, inocuos y nutritivos para que las personas pueda conseguir la energía y nutrientes necesarios para tener una vida sana, y, por último, pero no menos importante, que esta situación sea estable, continuada en el tiempo, y que no una odisea marcada por la incertidumbre [1].

Dadas las circunstancias en este horizonte de cambios a 2050, y más cercano aun, con las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible trazadas para el 2030, nace el interés por el desarrollo en alimentos que tengan una buena calidad nutricional, que cumplan con los requerimientos de energía y nutrientes necesarios en la población mundial, por lo que se genera el interés en el huevo. La FAO calificó este alimento como el recurso natural de mayor valor nutritivo, dado que está compuesto por proteína de máxima calidad por su elevado aporte de aminoácidos esenciales, lípidos con un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, vitaminas y minerales [2].

En general, el huevo es un alimento reconocido a nivel mundial por su valor nutritivo y su estructura diferencial que lo protege de contaminación exterior gracias a su cascara, membranas y barreras químicas antibacterianas que posee su composición. Sin embargo, el huevo es vulnerable a algunas enfermedades que pueden llegar a generar tox infecciones lo que ha generado la necesidad de un avance tecnológico para su control [3].

A través de los años y de diferentes metodologías de conservación se empezaron a plantear nuevos procesos para el huevo creando los ovoproductos líquidos, ovoproductos congelados y ovoproductos desecados. El inicio del procesamiento de ovoproductos se da en Estados Unidos entre 1950 y 1990, siendo el año 1985 donde se fortalece el interés en su producción.

Por su parte, Europa empezó años más tarde, pero con importantes avances desde 1980. Particularmente, para 1992 se reportó una producción mundial de ovoproductos de 2.3 millones de toneladas llevándose una gran parte América del Norte y Europa Occidental. Por otro lado, países como Japón, Australia, Brasil y Sudáfrica empezaban con el desarrollo de la industria de ovoproductos [4].

En Colombia, a partir de la importancia de la economía de origen avícola se han dado nuevos caminos en cuanto a procesos aplicados para el huevo generando ovoproductos, los cuales representaban que un 5% de la producción total en el año 2015, fuera transformada en ovoproductos, es decir, 610.000.000 de huevos. Con lo cual se abren nuevos caminos de la economía en Colombia. A su vez, a nivel mundial se estima que el 30% de la producción se dirige hacia los ovoproductos, que se transformen en huevo líquido, pasteurizado, yema líquida pasteurizada, clara de huevo en polvo, yema en polvo y huevo en polvo, asimismo se presentan productos de huevos cocinados listos para comer, entre otras opciones [5].

Por consiguiente, es pertinente dar un mayor reconocimiento a nivel nacional de los ovoproductos, enfatizando en las ventajas que traen a la industria alimenticia nacional, siendo procesos que le dan valor agregado al huevo, que pueden facilitar la fabricación de alimentos que ya están en el mercado o incorporar nuevos productos a partir de los ovoproductos. Así mismo, siguen las tendencias de alimentación saludable que se presentan actualmente a nivel nacional e internacional.

Estas características generan en el mercado interés en el desarrollo tecnológico por parte de las industrias avícolas para integrarse a nivel mundial cumpliendo con las características necesarias para la exportación a grandes potencias como lo son Japón, Europa o Estados Unidos, con lo cual se aprovecha la oportunidad de generar nuevos ingresos apoyando a la economía nacional.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 El sector avícola en Colombia

El sector avícola se establece en la década de los veinte y cuarenta, con el inicio de la venta en masa de huevos y aves. Sin embargo, en el año 1950 se presentó la enfermedad New Castle, lo que causó la muerte de doce millones de aves generando una revolución en el sector avícola, pues se hizo evidente la necesidad de pasar de un manejo casero y artesanal a metodologías industrializadas, con lo cual se dio un avance en el desarrollo de la avicultura. Sin embargo, se considera como inicio formal del sector avícola como industria el año 1960, ya que se establecieron importantes elementos para su desarrollo tecnológico, como incubadoras de pollo, de huevo, materias primas para concentrados, entre otros elementos esenciales para el sector.

Otro hito importante se da en el año 1983, cuando se creó el gremio y nace la Federación Nacional de Avicultores en Colombia, FENAVI [6]. La Federación se estableció con el fin de fortalecer y comercializar el sector avícola en Colombia dando inicio al Fondo Nacional Avícola FONAV en 1994 con el fin de contribuir económicamente en el desarrollo de la industria avícola en Colombia. Sus logros se evidencian en un incremento significativo en la producción apenas diez años después de la creación de FENAVI, pues para 1970 la producción registrada estaba por encima de 79.000 Tn, que en comparación con la producción en 1990 obtuvo un incremento del 623.31% pasando a producir 492.415 Tn.

Así mismo, los comportamientos del sector avícola fueron favorecidos con la apertura económica aumentando la producción y consumo debido a la baja de los precios de materias primas como el maíz, soya, entre otros. Lo que dio lugar a que en los años 90 el sector avícola tomara la mayor parte de cosechas como maíz, soya y sorgo para la alimentación de las aves. Para el 2001 se registraba un millón de toneladas en total para el sector avícola, mostrando un panorama favorable en el crecimiento del sector como se puede observar en la Tabla 1 [6].

Tabla 1. Producción avícola entre 1998 y 2004

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Producción avícola							
Total general (Toneladas)	886.209,7	936.976,9	949.143,3	1.021.458,9	1.058.664,6	1.127.036,0	1.158.003,3
Crecimiento %		5.73	1.30	7.62	3.64	6.46	2.75
Producción de pollo (Toneladas)	491.705,4	535.335,6	562.743,8	595.586,4	649.037,2	678.069,1	708.595,5
Crecimiento %		8.87	5.12	5.84	8.97	4.47	4.50
Producción de huevos (miles de unidades)							
Total general	6.575.070	6.694.022	6.439.991	7.097.874	6.827.123	7.482.782	7.490.131
Crecimiento %		1.81	3.79	10.22	-3.81	9.60	0.10

Acorde con el crecimiento del sector avícola, para el año 2002 FENAVI, en compañía del DANE, realizaron el primer censo de granjas en Colombia con el fin de obtener la información de capacidad instalada, área y producción, entre otras variables significativas con el fin de establecer las condiciones en las que se encontraba el sector, con lo cual Santander y Valle del Cauca se posicionaron como los departamentos con mayor producción avícola en Colombia [7].

En general, el sector avícola presentó un crecimiento de valor agregado del 6,6% del promedio anual entre los años 2000 y 2013, aumentando 4,4 % para un total de valor agregado agropecuario en el 2013 de 3,5% ubicándose como uno de los sectores que parte de un consumo intermedio del subsector avícola mayor al promedio, generando un crecimiento de 11.5% anual. Además, dentro de la actividad avícola el valor de la producción de carne de pollo aportó el 71,9%, los huevos el 28,1% y los subproductos el 0.1% restante [8].

Así mismo, para el 2017, FENAVI interesado en el desarrollo que se estaba dando en los huevos a nivel mundial en cuanto a la integración de nuevas técnicas de pasterización como la deshidratación de huevo, yema de huevo y aclara de huevo, puso en marcha la planta de ovoproductos, otra de beneficio de gallinas y del primer biodigestor del proyecto de generación de energía a partir de gallinaza por parte de la empresa Incubadora Santander integrando así una nueva economía y mercado: los ovoproductos [9]. Durante el

2018 la avicultura tuvo un gran escenario en la producción per cápita del país manteniéndose como uno de los principales protagonistas del crecimiento agropecuario. El huevo alcanzó la cifra de 14.606 millones de unidades, representadas en 876 mil toneladas, con un crecimiento de 5,6% con relación al año 2017.

En general, desde el establecimiento de FENAVI en los años 60 se propició el uso de una metodología óptima para la trazabilidad, desarrollo, inversión e investigación en el sector avícola. Lo que logró establecer este sector como uno de los líderes de producción en Colombia, contribuyendo a la generación de empleo y nuevas oportunidades de negocio a nivel nacional como lo muestra la línea de tiempo que se presenta en la Figura 1. Además de aportar al mundo un porcentaje de economía con las importaciones de huevos con fértiles, libres de patógenos, certificados de alta calidad, y exportaciones necesarias para el crecimiento de aves y para la creación y desarrollo de subproductos.

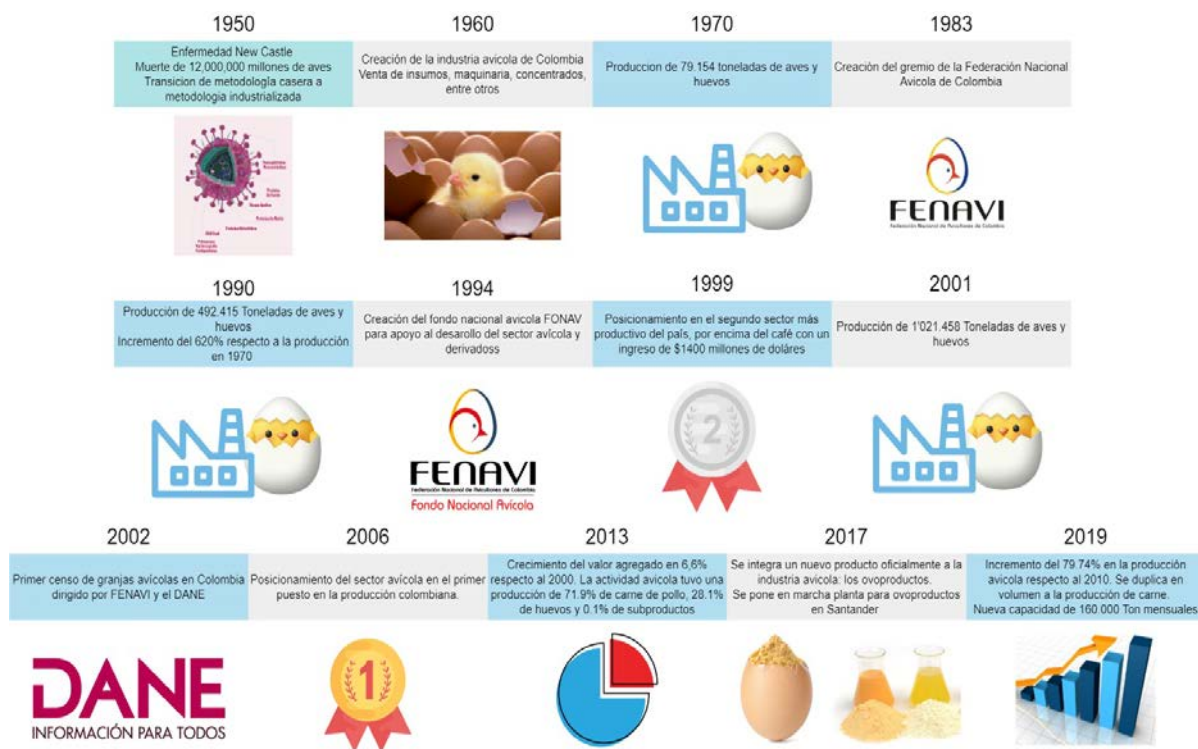


Figura 1. Línea de tiempo del sector avícola en Colombia

2.2 Desarrollo de la economía del huevo en Colombia

En Colombia se ha visto un crecimiento del consumo de huevo en 48% entre 2008 y 2018 hasta llegar a un promedio de consumo de 293 unidades por persona siendo el país con el segundo consumo más alto de la región, dando como resultado que el 49% de las personas consume huevo de manera diaria [10].

Por otra parte, Colombia ha tenido una gran participación en el sector avícola siendo uno de los pioneros en la economía agrícola. En cuanto a la producción de huevos para el consumo se ha llegado a valores hasta de 700.000 toneladas en 2015, generando un incremento de producción del 5% comparado con el año 2014. Sin embargo, la producción mundial de huevo ha llegado a valores de 80 millones de toneladas, lo cual debe tenerse en cuenta para llegar a tener una posición importante a nivel mundial.

A partir de la economía del origen avícola se han abierto nuevos caminos en cuanto a procesos aplicados a los huevos generando ovoproductos. El crecimiento en el mercado de estos productos ha encontrado un nicho, llegando a ser bastante solicitado en restaurantes, pastelerías, panaderías, hoteles, entre otros negocios. En Colombia, empresas como Nutresa, Bimbo y Ramo se han destacado por ser clientes potenciales de los ovoproductos, lo que promete a futuro una excelente oportunidad de innovación [5].

A su vez, se han dado avances pertinentes en mercados extranjeros desarrollados como es el caso de Japón, siendo destacado a nivel mundial por la alta demanda y versatilidad de recetas en que se integran los

ovoproductos. Debido a que se han abierto diferentes canales de exportación avalados por el INVIMA, se han generado diferentes estudios de la cultura japonesa con el fin de garantizar productos avícolas colombianos de calidad acreditados por esta institución para los consumidores con una de las mayores demandas a nivel mundial [11].

A través de las cifras que se evidencian durante los últimos veinte años se puede inferir que a pesar de que el mercado del huevo es dinámico tiene una tendencia de mejorar y generar economía en los procesos de distribución al presentar innovaciones para un mejor manejo del huevo.

2.3 Ovoproductos

Desde 1992 se ha tratado el termino de ovoproductos, así como la industrialización de los procesos del huevo, pasando de la rotura manual a una rotura a partir de maquinaria. Así mismo, se integró un avance en la maquinaria para separar la cascara de la parte líquida y más adelante se generó una maquinaria para separar la clara de la yema. Para ese año se reportó una producción mundial de ovoproductos de 2.3 millones de toneladas llevándose una gran parte América del Norte y Europa Occidental. Por otro lado, países como Japón, Australia, Brasil y Sudáfrica empezaban con el desarrollo de la industria de ovoproductos. Para este entonces, ya existían 300 fábricas de ovoproductos de las cuales 90 estaban ubicadas en Estados Unidos y respondían a la demanda de panaderías, pastelerías, fabricantes de pastas alimenticias, de helados, de salsas, charcuterías, industrias del pescado, entre otros, eran bastante solicitadas en este país [12].

El inicio del procesamiento de los ovoproductos se dio de forma congelada. Al pasar de los años, se tuvo un mayor interés y se generaron diferentes metodologías de conservación, se empezaron a plantear otros procesos para el huevo creando los ovoproductos desecados y ovoproductos líquidos (Figura 2). Estos últimos dejaron en segundo puesto a los productos congelados, junto con los desecados, que a través de los años han tenido un rápido desarrollo.

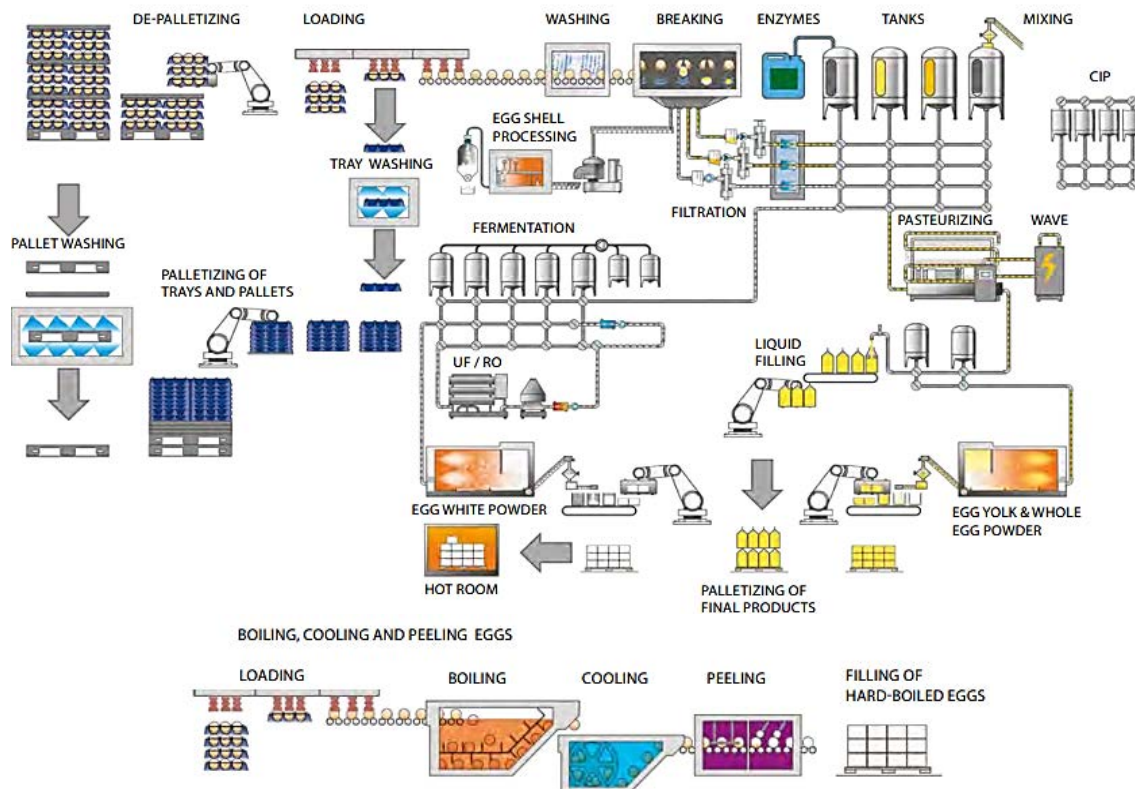


Figura 2. Proceso de producción de los ovoproductos [13]

En general, en la década de los 90 la economía del mundo variaba en relación con el comportamiento del consumo del huevo. Mientras que en algunos países en desarrollo la demanda de huevo era alta, en países con mayor desarrollo la demanda bajaba. Esto puede explicarse por el hecho de que la economía se

estabilizaba y las personas podían acceder a nuevos alimentos. Sin embargo, se encontró que los ovoproductos podrían ser un excelente producto en países desarrollados ya que les permitían adaptarse a formas modernas de consumo y distribución situándose en nuevos puntos de mira del mercado, tal como se venía evidenciando en países como Japón, Italia, Suiza, Estados Unidos, entre otros debido a la inocuidad que garantiza el proceso de pasterización.

Asimismo, el interés de los ovoproductos ha llegado a la producción de alimentos como parte de la dieta animal. Se han consolidado plantas que se especializan solo en esta área para garantizar sanidad en sus productos [14].

Para el 2019, resalta el caso particular de España, cuya innovación en los ovoproductos se encuentra muy desarrollada produciendo alrededor de 15.000 toneladas. Además, varias empresas ya cuentan con procesos a partir de los ovoproductos patentados, ofreciendo productos bajos en calorías y grasas, garantizando que estén libres de gluten y añadiendo nuevas presentaciones al mercado como huevo hilado yemas hiladas, cremas pasteleras, huevo en polvo y albumina en polvo, *high gel*, *high wip*, y yema en polvo, además, de una línea de huevo refrigerado en porciones entre otras presentaciones.

Actualmente, en cuanto al consumo a nivel mundial, se presenta un mayor consumo de huevo en México, seguido por Japón quienes han sido los principales consumidores de ovoproductos representando un 50% de consumo a nivel mundial por ser la forma más segura de incorporar huevo como ingrediente en diferentes alimentos [15].

2.4 Producción y consumo de huevos y ovoproductos en el mundo

Para el 2000 la lista de líderes a nivel mundial en producción de huevos la llevaba China, Estados Unidos Japón e India y como representante latinoamericano se encontraba México ocupando el quinto lugar. Para el año 2009 la producción de huevo la lideraba China con 23'654.000 de toneladas aumentando un 22% su producción en comparación al año 2000 mientras que México aumentó en un 33.5% su producción llegando a 2.384 toneladas. Por otro lado, en cuanto al consumo per cápita del huevo para el 2009 ya se reportaban datos del consumo de huevos en su estado natural y ovoproductos. La lista de consumo per cápita de huevo en su estado natural la lideraba México con 355 huevos seguido por China, Japón y Hungría. Colombia para este entonces se localizaba en el décimo puesto con un consumo de 215 huevos por persona.

A su vez, el consumo de ovoproductos a nivel mundial lo lideraba Emiratos Árabes consumiendo en partes iguales los huevos y los ovoproductos, seguido por Bélgica con menor consumo, pero con tendencia del consumo en partes iguales de huevos y ovoproductos, evidenciando una tendencia de mercado ascendente en los Países Bajos dado su alto consumo respecto a los demás. En lo relacionado con Latinoamérica, se empieza a dar el consumo de ovoproductos por medio de Argentina consumiendo apenas un 6% de ovoproductos mientras que el restante se daba en huevos naturales. Sin embargo, Argentina se encontraba como el tercer consumidor de huevo per cápita en América Latina ya que de primer y segundo lugar se encontraba México y Colombia respectivamente [16].

Para el 2016 el consumo per cápita más alto del huevo se dio en México y Rusia con un consumo de 371 y 295 unidades de huevo al año respectivamente. De allí siguen Argentina, Estados Unidos y Colombia con más de 250 unidades de huevo consumidas por persona al año. De esta manera se puede evidenciar que el alto consumo del huevo es pertinente en países de bajas economías puesto que América Latina ocupa tres de los cinco países con mayor consumo, lo que viene dado por el excelente valor nutricional que tiene el huevo a un bajo precio [17].

Para el 2017 en cuanto a la producción de huevo se encuentra como líder en América del Sur a Brasil y como segundo en América Latina, lo cual se debe a su desarrollo e investigación en el ambiente genético de las aves para proporcionar ambientes fértiles a nivel industrial que se ha aprovechado de manera inteligente mediante diferentes estrategias. Por otra parte, en Argentina se da un desarrollo a partir del valor agregado que le dan al huevo que se comercializa tanto a nivel nacional como internacional y su desarrollo en líneas genéticas. En cuanto a Colombia, se le caracteriza por la participación durante más de 50 años en la

producción de huevo y en la participación de nuevos mercados presentando productos innovadores como los ovoproductos o huevos en lonchas bastante comercializados a nivel internacional. Para el caso de Chile, se presenta un aumento de 2.8% en los últimos 10 años, igualmente, tienen un mercado especial debido a los huevos azules característicos de la gallina Araucana que los hace interesantes. En países como Uruguay se da una baja en cuanto a la exportación ya que su único mercado por fuera del país es el huevo en cascara, mientras que en Bolivia, Ecuador, Paraguay, Perú y Venezuela no se presentan exportaciones por factores ya sean económicos, de consumo, o por limitaciones en desarrollo e investigación [18].

Para el año 2018 se encuentra un mayor consumo en los Países Bajos, con un consumo per cápita de 700 huevos por persona al año, seguido por un país arábico con un consumo de 527 huevos por persona al año y en la tercera posición se encuentra México con 455 huevos por persona al año con una diferencia del 54% aproximadamente respecto a la primera posición, como se observa en la Figura 3.

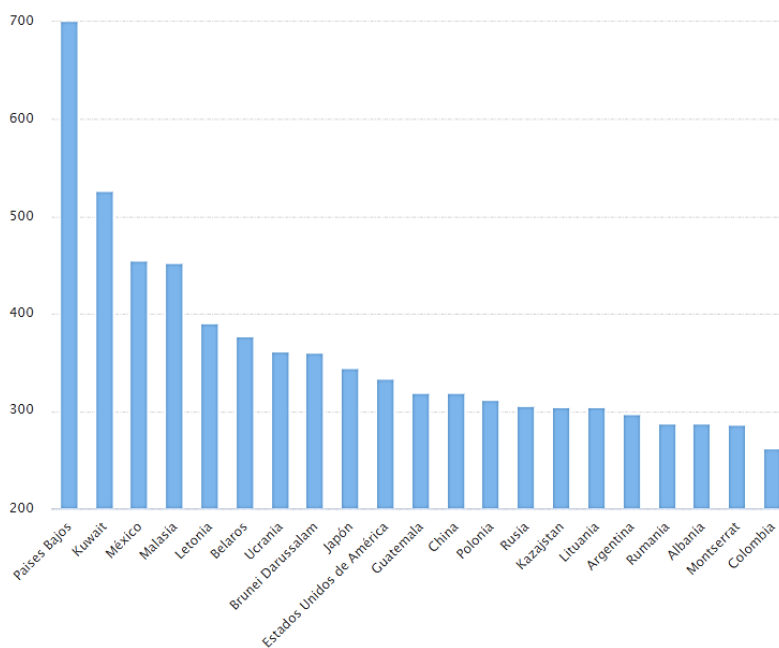


Figura 3. Consumo por habitante en el mundo [19]

Por otro lado, Colombia se encuentra en la posición 26 con un consumo per cápita de 262 huevos con una diferencia significativa con relación a la primera posición, dando como conclusión que el consumo de huevo es bastante apetecido tanto en los países desarrollados como en vía de desarrollo, lo que muestra que la economía a partir del huevo es rentable, pues el incremento de consumo se mantiene año tras año, lo que también incrementa la necesidad de investigación y desarrollo en torno a este alimento para lograr abastecer la demanda. Otro factor importante en el crecimiento de la economía a través del huevo es a partir de la industria ya que está ligada al crecimiento de la población y su capacidad adquisitiva, lo que unido con los desarrollos tecnológicos la hace una industria con proyección de crecimiento en el mediano y largo plazo.

3. MÉTODO

Para iniciar este trabajo, se realiza una búsqueda sobre los beneficios del huevo y su consumo habitual en la dieta de las personas a nivel nacional y mundial. Luego, se lleva a cabo un análisis de mercado, que se complementa con un análisis económico sobre el consumo de los huevos, tanto a nivel industrial como directamente con el consumidor final. Posteriormente, a partir de los beneficios y dificultades que trae consigo el huevo en la industria alimentaria se plantea el análisis de la innovación de los ovoproductos en el campo avícola a nivel mundial que fomenta a un nuevo mercado.

Con estos antecedentes se encuentran las razones por las cuales los ovoproductos son de interés en la industria puesto que brindan una mayor versatilidad ya que se pueden emplear los derivados del huevo apropiados para cada uno de los procesos disminuyendo tiempos y desperdicios de producto. Por otra

parte, también facilitan el empleo y dosificación en la industria, eliminan en gran cantidad los residuos de cascara de huevo, brindan una mayor seguridad biotecnológica, y dan una manipulación más sencilla en almacenamiento, control de fechas de caducidad, ahorro de tiempo y la facilidad de distribución en comercios nacionales e internacionales.

Evidenciando los efectos que traen consigo los ovoproductos en la industria se plantea una comparación de producción en la industria colombiana frente a los ovoproductos y la industria a nivel mundial. Adicionalmente, se plantean diferentes investigaciones que se han aplicado para la innovación de productos a partir de los ovoproductos con el fin de mostrar los posibles nuevos mercados a los que se pueden llegar por medio de las tendencias saludables impuestas actualmente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Producción de huevos y ovoproductos en Colombia

En Colombia, como se presenta en la Tabla 2, para el período 2009 a 2013 el Valle del Cauca fue el segundo productor de huevos, precedido solo por Cundinamarca. A su vez, es el principal exportador de huevos en el país siendo uno de los pioneros en la producción de ovoproductos en Colombia como huevo líquido ultrapasteurizado, huevo en polvo y huevo en tajadas.

Tabla 2. Producción de los principales departamentos de Colombia (millones de unidades) 2009 – 2013 [20]

Departamento	2009	2010	2011	2012	2013	Participación %
Colombia	9.682	9.749	10.662	10.606	11.127	100
Cundinamarca	2.526	2.313	2.688	2.721	2.832	25.5
Valle	1.746	1.839	2.042	2.071	2.250	20.2
Santander	2.066	2.235	2.330	2.133	2.183	19.6
Antioquia	778	824	851	974	1.092	9.8
Cauca	432	440	487	619	615	5.5
Tolima	679	665	794	570	533	4.8
Caldas	206	195	176	232	264	2.4
Norte de Santander	310	278	325	289	259	2.3
Huila	209	214	220	199	233	2.1
Atlántico	138	150	165	153	167	1.5
Boyacá	134	134	155	143	121	1.1
Risaralda	92	83	83	96	119	1.1
Quindío	135	144	107	137	102	0.9
Sucre	29	27	24	32	75	0.7
Magdalena	61	60	58	60	68	0.6

El Valle del Cauca aporta el 20.2% de la producción nacional. En el 2013 el departamento tuvo una producción de 2.249 millones de huevos generando un crecimiento del 8.6% en comparación del 2012. El Valle del Cauca tiene un futuro prometedor en cuanto al liderazgo en la producción de huevos a nivel nacional ya que tiene porcentajes muy similares a los de Cundinamarca, actual líder de producción a nivel nacional.

Aunque lo más relevante de la industria del huevo en el Valle del Cauca se da en razón a que para el 2013 sus ventas en el exterior representaron 554 mil USD con un 51,3% del valor total de exportaciones como se puede observar en la Figura 4.

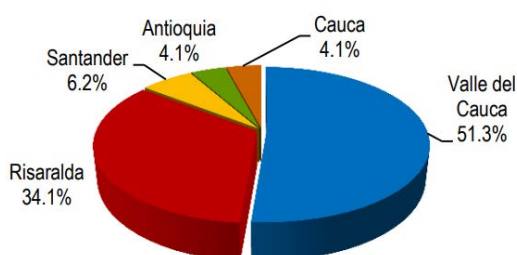


Figura 4. Participación por departamentos en las exportaciones del huevo en Colombia – 2013 [20]

4.2 Producción de huevos y ovoproductos a nivel mundial

En cuanto a la producción y el comercio mundial de los ovoproductos se estima que para el 2012 existen 350 plantas de procesamiento de huevos en el mundo con una capacidad de producción cercana a 5 millones de toneladas siendo Europa uno de los mayores exponentes de la producción a nivel mundial seguido por Norteamérica y Asia.

En la producción de ovoproductos Holanda fue el mayor fabricante con una participación del 36% del total de la producción regional mientras que Estados Unidos genero un total de 1.5 millones de toneladas de ovoproductos. A partir de este desarrollo en los huevos, en Colombia, se ha visto un incremento de exportaciones pasando de 712 mil dólares en 2009 a 1.638 miles de dólares en 2012, llegando a importar hasta 1.766 miles de dólares de ovoproductos teniendo una tendencia de consumo ascendente como se puede observar en la Figura 5. Sin embargo, a nivel mundial Latinoamérica aún no se encuentra en los principales países que exportan ovoproductos y, aun así, Colombia no está incluido en el ranking a nivel mundial por lo que genera interés en la industria para garantizar ovoproductos colombianos de calidad que cumplan con los requerimientos externos y así tener un mayor ingreso a partir de ellos como se ha venido dando con las exportaciones hacia Estados Unidos y Venezuela.

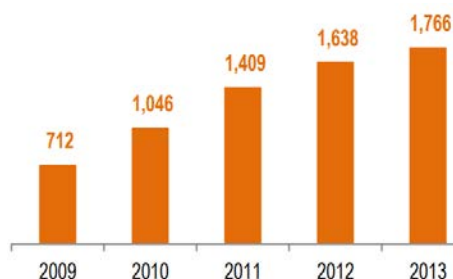


Figura 5. Importaciones colombianas de ovoproductos (USD Miles) 2009 – 2013 [20]

A partir de las cifras de importaciones colombianas se evidenció que en 2013 se alcanzaron valores de 1.7 millones de dólares en importaciones, donde el 100% fueron a partir de ovoproductos secos. A través de todo el desarrollo que trae consigo los ovoproductos en Colombia se han posicionado cinco empresas para la elaboración de productos derivados del huevo como Avinal perteneciente al departamento de Antioquia, Santa Reyes del departamento de Cundinamarca, Triple A del Tolima, Alcampo de Santander y Ovopacific del Cauca.

En el caso de Ovopacific, la producción de ovoproductos inicia en el 2010, siendo una de las industrias pioneras en la fabricación de ovoproductos a nivel nacional atendiendo a las industrias alimentarias y a los consumidores como tal. Todo este desarrollo se da a partir de la sofisticación de la cadena valor haciéndolos líderes en innovación lo cual genera que su producción se vea incrementada a nivel nacional generando 12.000 toneladas al año de ovoproductos líquidos y 400 toneladas al año de ovoproductos deshidratados.

Es pertinente resaltar que desde el 2011 FENAVI junto con diferentes empresarios del sector con énfasis en producir ovoproductos empezaron a establecer las características mínimas para la legislación de la producción de los ovoproductos en Colombia, logrando que para el año 2015, los ovoproductos tuvieron un avance al establecer en el país los requisitos de calidad que debe cumplir la industria para producir este insumo. En ese año en Colombia ya se contaba con 6 plantas de procesamiento de ovoproductos y una en proyecto por lo que la estandarización de la norma técnica colombiana significa un gran adelanto para que esta industria que se está desarrollando, tenga unos parámetros establecidos de calidad e inocuidad para la tranquilidad de la industria nacional y de los consumidores finales [21].

Para el 2017 se importaron 245,3 toneladas en ovoproductos, con un costo de 1.28 millones de dólares, donde la mayor proporción se la llevó la yema de huevo en polvo mientras que para el 2018 se importaron 165 toneladas como se puede ver en la Figura 6, representadas en 1.09 millones de dólares manteniendo el mayor porcentaje en la yema de huevo en polvo. Al tener una disminución del 32.8% de importación en ovoproductos del 2017 al 2018 se favorece la producción nacional de ovoproductos aumentando la

demanda principalmente de la yema de huevo en polvo seguida por el huevo en polvo y por último la ovoalbúmina en polvo.



Figura 6. Importación de ovoproductos en toneladas 2013 - 2018 [22]

En cuanto al origen, el principal proveedor de los ovoproductos importados fue Argentina con un 45.2% seguido por Estados Unidos y Perú con 40.9% y 13.9% respectivamente mediante los acuerdos de Mercosur (45%), TLC con Estados Unidos (41%) y el Acuerdo de Cartagena (14%), con precios desde 3.75\$/Kg hasta 9.52\$/Kg como se puede observar en la Figura 7.

Descripción	Argentina	Estados Unidos	Perú
Huevos secos	8,1	9,52	7,85
Yemas secas	6,63	7,16	7,09
Ovoalbúmina	6,76	5,42	3,75

Figura 7. Precio de importación de ovoproductos [22]

Por otro lado, a pesar de la pandemia a partir del COVID-19 se ha reflejado muy buenas cifras de producción de huevo en Colombia pasando de 862.964 toneladas producidas en 2019 a 982.895 toneladas para 2020, como se puede ver en la Figura 8, incrementando aproximadamente 14% y, para lo que va del año 2021, se han producido 683.828 toneladas de huevos lo que indica en promedio un aumento del 5.1% respecto a lo que se había producido para el año anterior generando un escenario favorable en la economía avícola [23].

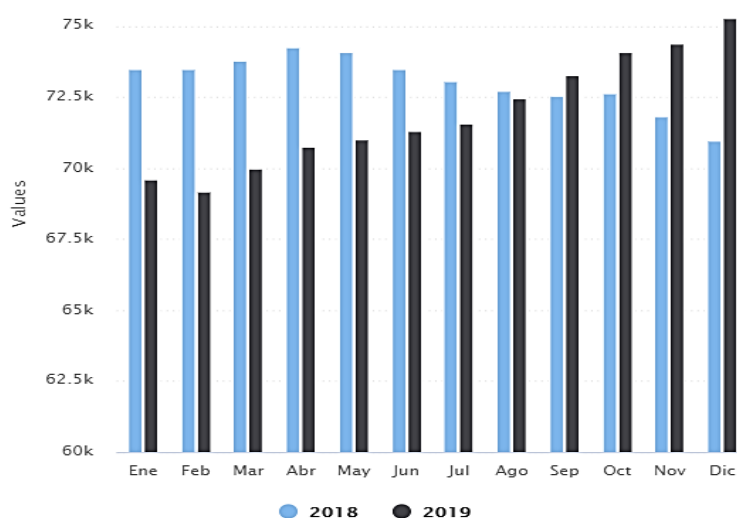


Figura 8. Producción de huevo en toneladas en 2018 y 2019 [23]

En cuanto a la producción de ovoproductos se han registrado solamente siete plantas autorizadas en el año 2021, debido a los estrictos protocolos y medidas sanitarias que se requieren para su producción que solo cumplen algunas empresas, como Kikes, Adikos y Ovopacific que presentan una infografía sobre los ovoproductos en la Figura 9. Sin embargo, varias plantas ya están construidas para la producción de ovoproductos y están en proceso de autorización, a partir de esto se ha notificado que los ovoproductos se han posicionado con un 2% de la producción mensual que representan 85.707 toneladas, solamente para el mes de marzo del 2021 [23].



Figura 9. Producción de ovoproductos en el 2021 [24]

4.3 Investigación y desarrollo en los ovoproductos

Las tendencias en el mercado resultan tener características más saludables que se ha venido imponiendo en los últimos años, sin embargo, los consumidores destinan la mayor parte de su tiempo a trabajar por lo que buscan alimentos que sean de rápido consumo pero que tengan alto valor nutricional y tenga un precio asequible.

En general, los ovoproductos se caracterizan por ser una fuente altamente proteica y con una relación de costo-beneficio favorable, lo que hace que sea interesante su integración en el mercado del consumidor informado de la existencia de este nuevo desarrollo en el sector avícola.

Para el encuentro de la *International Egg Commission* en el 2014 realizado en Viena se analizaron los diferentes intereses de los consumidores en donde se pudo mostrar una importancia hacia los productos orgánicos y amigables con el medio ambiente (Figura 10), así como el bienestar animal por lo que se cree que un ave con buenas condiciones pondrá huevos con mejor calidad nutricional (Figura 11).

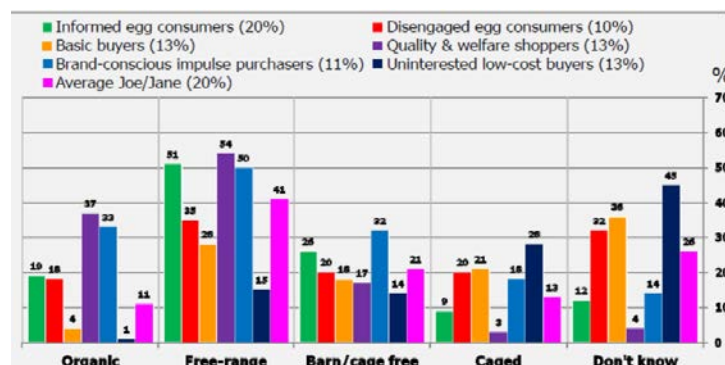


Figura 10. Clasificación de huevos que los compradores adquieren [25]

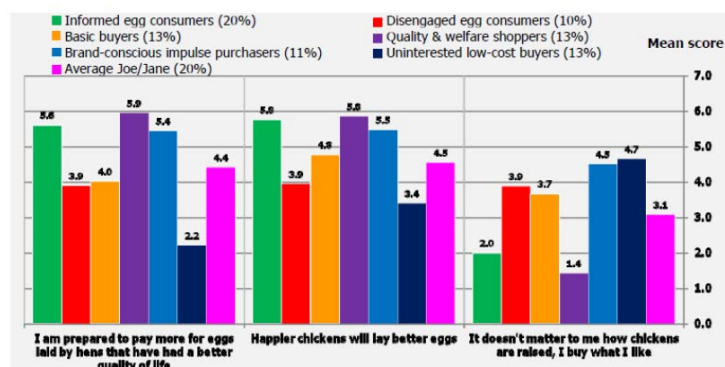


Figura 11. Consumidor de huevo respecto al bienestar animal [25]

En general, los estudios demuestran que el huevo es una de las opciones más populares en el desayuno colombiano sin embargo esto da también la iniciativa a crear nuevas alternativas alimenticias que generen un incremento del consumo del huevo en el almuerzo, snacks o la cena ya que se encontró que el 39% de los colombianos busca que los alimentos sean saludables, el 29.7% que sea de buen sabor y el 15.8% que sea nutritivo, abriendo nuevas alternativas para la aplicación de ovoproductos que cumplan con estas características [26].

Por otro lado, se han presentado algunas opciones para el avance en el mercado de los ovoproductos en cuanto a la variación de su embalaje generando diferentes propuestas de alternativas de embalaje para el diseño de nuevos productos e integrar nuevos métodos de secado del huevo para desarrollar la actividad hacia la exportación [27].

Asimismo, se han presentado nuevas industrias como Sanovo Technology Group, con énfasis en la producción de equipos para la manipulación y el procesamiento de huevos, enzimas para ovoproductos con altas propiedades funcionales, vacunación in-ovo, automatización y robótica, y equipos para la inoculación y cosecha de huevos para la producción de vacunas [28].

4.4 Ventajas y amenazas de los ovoproductos

Una de las grandes ventajas del procesamiento de los ovoproductos es la disminución de peso del producto, mientras que un huevo pesa entre 60 y 65 gramos, un huevo entero en polvo pesa 12 gramos disminuyendo un 19,2% de peso en promedio, por otro lado, mientras 1 kg de huevos frescos contiene 16 unidades, 1 kg de huevo en polvo contiene 83 huevos dando una gran ventaja al momento de transportar, almacenar y distribuir [29].

Otra ventaja a partir de la disminución de peso y tamaño es su mayor versatilidad ya que se pueden emplear los derivados apropiados para cada fin, tienen un fácil almacenamiento, empleo y dosificación, evitan los inconvenientes derivados de la manipulación de las cáscaras y ahorran mano de obra y tiempo, brindan una mayor garantía de control bacteriológico y facilitan la distribución, ya que en muchos casos se reduce el volumen a transportar y se prolonga la vida útil respecto del huevo fresco [30].

A partir del nuevo mercado impuesto por los ovoproductos a nivel mundial se establecen las amenazas u oportunidades que esto traería para el desarrollo en Colombia. Por un lado, que otros países logren tomar el liderazgo en la producción de ovoproductos y se queden con mayor parte del mercado en España y Europa, y, por otro lado, es una excelente oportunidad si el desarrollo en el campo de ovoproductos a nivel nacional puede establecerse en el mercado principal en los cinco continentes [31].

En cuanto a la carga impositiva, una desventaja de los ovoproductos en Colombia es el impuesto al IVA del 19%, mientras que el huevo como tal no tiene ningún impuesto [32].

4.5 Innovación de los ovoproductos en Colombia

A partir de la necesidad de innovación en Colombia, Ovopacific ha ido incursionando en productos que puedan cumplir con las necesidades de los consumidores desde el 2003 a partir de creaciones con ovoproductos como insumo principal.

A través de los años crearon el huevo pasteurizado con el fin de cumplir con la demanda de huevo líquido en el país, y, para el año 2011 se creó un nuevo producto llamado *Ovitas* tajadas de clara de huevo que servirán como complemento para la alimentación [33].

Por otro lado, se ha fortalecido en el área de investigación y desarrollo por medio de la FENAVI, generando proyectos con diferentes empresarios con el fin de invertir en la investigación y desarrollo de los ovoproductos dando como resultado diferentes proyectos en alianza con la Universidad de La Salle con énfasis en el análisis de ovoproductos en polvo tales como huevo, clara y yema de huevo para dar nuevas opciones para los ovoproductos en Colombia [34].

5. CONCLUSIONES

A consecuencia de la necesidad de la supervivencia humana en el planeta a largo plazo se plantea al huevo como un alimento que trae consigo un aporte nutricional pertinente en el día a día de los humanos [35] y una economía consigo que genera un desarrollo a nivel mundial dando en parte una solución para la demanda alimenticia en todo el mundo. El huevo se caracteriza por ser un alimento que se reconoce en gran parte de los países de todo el mundo en donde su consumo logra competir con alimentos de alto valor proteico y es bastante interesante en industrias alimenticias a partir de las características estructurales que tiene y las propiedades que puede aportar a los alimentos procesados. Sin embargo, trae consigo ciertos tratamientos necesarios para su comercialización que pueden ocasionar riesgos en su estructura física generando pérdidas en procesos como almacenamiento y transporte.

De esta forma, el huevo trae no solo un aporte nutricional en la dieta sino también un aporte económico al sector avícola, no solo en Colombia sino a nivel mundial a partir de la demanda que se genera día a día, es por lo que este es un alimento interesante para la investigación y desarrollo con el fin de abrir nuevos mercados partiendo de la innovación y la necesidad del cliente como lo son los ovoproductos.

Por lo anterior, a partir del huevo se plantea una economía en base a los ovoproductos que se ha creado desde 1960 pero que aun 60 años después no ha tenido la acogida que debería en todo el mundo trayendo consigo escenarios diferentes, en donde los países desarrollados lo tienen como un producto de consumo de su día a día mientras que para Latinoamérica es una nueva oportunidad en el mercado.

Es por lo que la innovación generada a partir del desarrollo de nuevos productos derivados del huevo como lo son los ovoproductos, aporta de una manera significativa al sector avícola, incrementando no solo su consumo sino también favoreciendo al mercado con mayor valor en ventas y un portafolio de productos amplificado trayendo consigo oportunidades a nivel nacional e internacional [36] al dar un valor agregado a los huevos y nuevas facilidades en logística de transporte y almacenamiento de grandes y pequeñas industrias que lo adquieran.

En este sentido, los ovoproductos cuentan con ventajas de vida útil extendiendo su media de vida garantizando inocuidad en el alimento disminuyendo totalmente los riesgos de desperdicio por fractura en su estructura y disminuyendo los costos de transporte y almacenamiento puesto que el peso por huevo natural es reducido en un 19% aproximadamente.

Finalmente, la investigación apunta al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible como lo es *hambre cero* puesto que el huevo es un gran aliado para la lucha contra el hambre y la malnutrición en zonas de muy bajos recursos siendo un alimento de bajo costo. Además, por medio del incremento de consumo se aporta al *trabajo decente y crecimiento económico* aportando al desarrollo de pequeñas y grandes empresas e industrias, beneficiándose del nuevo mercado como lo es los ovoproductos aplicando un aporte a la *industria, innovación e infraestructura* que puede dar un futuro comprometedor en Latinoamérica por medio de *alianzas para lograr objetivos* de diferentes áreas de conocimiento para poner en pie nuevas alternativas en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] Ayuda En Acción. "¿Qué es la seguridad alimentaria?" 2019, Recuperado: <https://ayudaenaccion.org/ong/blog/sostenibilidad/que-es-la-seguridad-alimentaria/>
- [2] Abad, J. "El Huevo: El recurso más nutritivo que existe en la naturaleza. Asociación Latinoamericana de Avicultura (ALA)", *Boletín* 4(37), 2007.
- [3] Instituto de Estudios del Huevo. "Seguridad alimentaria en huevos y ovoproductos". 2006, Recuperado: http://www.federovo.net/portal1/images/content/seguridad_alimentaria_huevos_ovoproductos.pdf
- [4] Sinquin J. "El mercado de los ovoproductos". 1992, Recuperado: https://ddd.uab.cat/pub/selavi/selavi_a1992m7v34n7/selavi_a1992m7v34n7p486.pdf
- [5] Industria Avícola. "Colombia destina el 5 por ciento de sus huevos a ovoproductos". 2016, Recuperado: <https://www.industriaavicola.net/mercados-y-negocios/colombia-destina-5-por-ciento-de-sus-huevos-a-ovoproductos/>

- [6] A. Pimiento, J. Vega. "Características del sector avícola colombiano y su reciente evolución en el departamento de Santander", Centro Regional de estudios Económicos Bucaramanga, 2005.
- [7] M. Aguilera. "Determinantes del desarrollo en la avicultura en Colombia: Instituciones, organizaciones y tecnología." Banco de la República, *Documentos de trabajo sobre economía regional*, 2014.
- [8] FENAVI. "Informe económico", 2013.
- [9] FENAVI. El Sector Avícola Creció 4.9% en el Primer Semestre del 2017. 2017, Recuperado: <https://fenavi.org/comunicados-de-prensa/el-sector-avicola-crecio-4-9-en-el-primer-semester-del-2017/>
- [10] Y. Bolívar, G. Díaz. "Caracterización de la compra del huevo y el consumo de los ovoproductos en la ciudad de Manizales (Caldas)". Universidad de Manizales, 2019.
- [11] PROCOLOMBIA. Colombia se perfila como proveedor de pollo y huevo para Japón. 2015, Recuperado: <https://www.colombiatrade.com.co/noticias/colombia-se-perfila-como-proveedor-de-pollo-y-huevo-para-japon>
- [12] J. Sinquin. El mercado de los ovoproductos. *Tendance des Marchés*, 1991: 36, 9-17.
- [13] SANOVO, "Complete guidebook on how to process eggs. Breaking, separation, pasteurization, concentration, drying, and boiling", 2021.
- [14] Alimarket. El mercado de ovoproductos se reactiva vía lanzamientos e inversión. 2020, Recuperado: <https://www.alimarket.es/alimentacion/informe/315540/el-mercado-de-ovoproductos-se-reactiva-via-lanzamientos-e-inversion/informe-completo>
- [15] M. Baujtista, "Ovoproductos, el ABC de la norma técnica", *AGRONEGOCIOS*, pp. 14, Febrero 2016.
- [16] Hy-Line. Análisis del mercado mundial del huevo y ovoproductos. 2011, Recuperado: <https://www.elsitioavicola.com/articulos/2044/analisis-del-mercado-mundial-del-huevo-y-ovoproductos/>
- [17] Y. Bolívar, G. Díaz. Caracterización de la compra del huevo y el consumo de los ovoproductos en la ciudad de Manizales (Caldas), 2019.
- [18] F. Rodriguez, et al. "América del Sur y producción de huevo: Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela, Surinam y Guyana (Parte 2)", 2017.
- [19] FENAVI. Consumo per cápita mundial del huevo. 2021, Recuperado: <https://fenavi.org/estadisticas/consumo-per-capita-mundo-huevo/>
- [20] Cámara de Comercio de Cali, "Más allá de la producción de huevo: Los Ovoproductos", Cámara de comercio, *informe* No. 10, 2014.
- [21] Contexto Ganadero. Ovoproductos ya cuentan con reglamento de producción. 2015, Recuperado: <https://www.contextoganadero.com/economia/ovoproductos-ya-cuentan-con-reglamento-de-produccion>
- [22] FENAVI. Boletín FENAVIQUIN – Programa de estudios económicos – Fenavi-Fonav. *Boletín* N° 283 – 12. 2019.
- [23] FENAVI. "Estadísticas del sector". 2021, Recuperado: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1538599527297-00c49504-fad2>
- [24] AGRONEGOCIOS. "Los ovoproductos representan 2% de la producción mensual de huevo en el país". 2021, Recuperado: <https://www.agronegocios.co/agricultura/los-ovoproductos-representan-2-de-la-produccion-mensual-de-huevo-en-el-pais-3155023>
- [25] International Egg Commission. The International Egg Commission (IEC) has announced that the IEC Vienna 2014 Business Conference will be held at the Hilton Vienna Hotel, Vienna, Austria from 30 March to 1, April 2014.
- [26] D. Zuluaga, P. Fernández. "Estudio del mercado del huevo como materia prima para la elaboración de ovoproductos". 2014, Recuperado: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/5097/DianaZuluaga_PilarFernandez_2014.pdf?sequence=2
- [27] I. Molfese. "¿Por qué invertir en ovoproductos?" 2014, Recuperado: <https://www.avicolatina.com/es-ES/2014-01-28-14-10-31/boletines-anteriores/136-boletin-106-43?showall=&start=1>
- [28] SANOVO. "Los mejores equipos para el procesamiento de huevos". 2021, Recuperado: <https://www.sanovogroup.es/clientes/kikes/>
- [29] M. Leguizamon, "Viabilidad comercial para la exportación de ovoproductos". Instituto Tecnológico Buenos Aires. 2005. <https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/490/Leguizam%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [30] Revista Alimentos. "Los ovoproductos, una alternativa innovadora para el mercado". 2016, Recuperado: <https://www.revistaalimentos.com/los-ovoproductos-una-alternativa-innovadora-mercado/>
- [31] AVICULTURA. "Efectos de la globalización en el mercado de los ovoproductos". 2018, Recuperado: <https://avicultura.com/jpa18-efectos-de-la-globalizacion-en-el-mercado-de-los-ovoproductos/>
- [32] AviNews. "FENAVI: Andrés Valencia analiza resultados de la avicultura colombiana". 2018, Recuperado: <https://avicultura.info/fenavi-andres-valencia-analiza-resultados-de-la-avicultura-colombiana/>
- [33] El Nuevo Siglo. "Ovitas revoluciona mercado de alimentos". 2014, Recuperado: <https://elnuevosiglo.com.co/articulos/7-2014-ovitas-revoluciona-mercado-de-alimentos>
- [34] FENAVI. "Más opciones para los ovoproductos en Colombia, una iniciativa de Universidad de La Salle y Fenavi", *Revista avicultores*, vol. 279, pp. 32-33. Febrero, 2020.
- [35] FAO, "Huevos: aprovechar su potencial para luchar contra el hambre y la malnutrición", Informe No. 154, 2018.
- [36] B. José, "Oportunidades y amenazas en el sector industrial de los ovoproductos", *Técnica industrial*, 267, pp. 36-41, 2007.

Los Sistemas de Información Geográfica SIG en el estudio de las variaciones en los patrones de ordenamiento y estructura espacial del paisaje en Medellín en las últimas cuatro décadas

Olgalicia Palmett-Plata¹

Ana Sofía Henao-Tamayo²

Jaime García-Leal³

Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia
Colombia

El área de Medellín ha tenido en los últimos 40 años transformaciones en su dinámica urbana, que podrían considerarse favorables para el fortalecimiento identitario y la sostenibilidad del territorio, sin embargo, existe otro tipo de transformaciones imperceptibles que acontecen conjunta y subrepticamente con las transformaciones normales y esperadas de los distintos cambios de la dinámica urbana. Estas transformaciones, poco perceptibles, deben ser calculadas, ya que muchas veces acarrear problemáticas que pueden ser evitadas con un debido control en la planeación y ordenamiento territorial. Una de las estrategias utilizadas para calcular las transformaciones, modificaciones y variaciones del territorio en el tiempo es la ecología del paisaje, a través de las métricas de análisis espacial de los patrones de ordenamiento y la estructura espacial del paisaje. Para ello es necesario el uso y combinación de herramientas digitales y fotogrametría satelital, así como la percepción detallada y perspicaz de todos los componentes del paisaje para su valoración y contraste. Este trabajo recoge la experiencia en la combinación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica SIG, para calcular y establecer la importancia y las repercusiones que tienen las variaciones en los patrones de ordenamiento y la estructura espacial del paisaje en el área de Medellín en las últimas cuatro décadas, y que no han sido percibidas ni divulgadas desde la modificación del paisaje.

¹ Licenciada en educación, Especialista en Docencia Investigativa Universitaria y Magister en Diseño del Paisaje.

Contacto: olgalicia.palmett@colmayor.edu.co

² Arquitecta y Especialista en Planeación urbana.

Contacto: ana.tamayo@colmayor.edu.co

³ Ingeniero Catastral y Geodesta, y Magister en Estudios Urbano regionales.

Contacto: Jaime.leal@colmayor.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los procesos urbano-ecológicos, se hacen más necesarios en contextos como el latinoamericano, en la medida que, a diferencia de los países desarrollados, en este no se ha contado con la ventaja de un crecimiento gradual que apunte a su detalle a largo plazo, de manera que se dé el tiempo necesario para alcanzar la ecoeficiencia proporcionalmente a la magnitud del problema ambiental y de ocupación espacial. Los patrones de ordenamiento espacial, permiten visibilizar la ocupación y urbanización del territorio, los cuales sirven como instrumento para analizar las lógicas de ordenamiento y las estructuras ecológicas dentro de un determinado territorio.

Para entender la relación de los elementos del paisaje y el funcionamiento de los componentes entre sí, es necesario en primer lugar, cuantificar la estructura del paisaje y luego se analizan sus funciones. Morláns [1], considera que la unidad elemental del mosaico paisajístico es el parche, estos en conjunto con sus diferentes atributos como el tamaño y la forma entre otros, crean un mosaico paisajístico. Las zonas de borde se definen como la transición entre dos comunidades vegetales adyacentes y los corredores como elementos lineales o en faja.

El análisis del territorio permite estudiar mediante un mosaico, los patrones que son determinantes en la estructura del paisaje y generan la identidad del territorio a partir de la combinación de atributos, esto permite entender la forma del paisaje y la variación a través del tiempo. Tirado [2] afirma que un mosaico *es aquella identidad reconocible en un determinado paisaje, que surge de la percepción de los patrones asociados a la combinación de sus atributos estructurales, biofísicos, culturales y estéticos.*

La ecología del paisaje es una disciplina relativamente nueva que se caracteriza por: 1) hacer comprensibles las estructuras y los procesos espaciales que relacionan naturaleza y sociedad a nivel del paisaje; 2) agrupar diferentes objetivos ambientales para ofrecer nuevas soluciones a los problemas ligados a la utilización de las tierras; 3) operar a la escala adecuada, entre local y global, lo que permite obtener tanto un impacto visible como una fuerte probabilidad de éxito a largo plazo; y 4) las múltiples formas de analizar las estructuras espaciales, la dinámica de las poblaciones en los paisajes, las redes entre estos, la conectividad y el paisaje como objeto de estudio, así como la organización de los cambios de utilización de las tierras.

En otras palabras, la ecología del paisaje presenta grandes e insuperables estrategias para definir los patrones de ordenamiento territorial y realizar un estudio detallado de la estructura espacial como de los elementos del paisaje [3]. Usaremos en este caso, la ecología del paisaje basada en el modelo matriz-corredor-tesela del paisaje (unidad de paisaje). De esta forma, esta disciplina aportará un marco contextual adecuado para el estudio de las alteraciones en las estructuras espaciales de los paisajes consecuencia de los procesos territoriales [4].

Es importante señalar que este trabajo forma parte del proyecto de investigación titulado: Variaciones de los patrones de ordenamiento y estructura espacial del paisaje en Medellín, financiado por la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia y el Centro de Investigaciones del Colegio Mayor de Antioquia CICMA, estudio llevado a cabo por docentes de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería de los programas de Arquitectura Tecnología en Delineante de Arquitectura e Ingeniería y Tecnología en Gestión Catastral, el cual se encuentra en proceso de avance y que tiene como objetivo general, evidenciar la selección, aplicación e interpretación de las variaciones en los patrones de ordenamiento y la estructura espacial del paisaje del área de Medellín durante los últimos 40 años, para dar respuesta a la identificación de medidas de actuación y conservación de los servicios ecosistémicos en la ciudad.

En primer lugar, es importante entender a qué se refiere el concepto de *patrón*, que Troll [5] define como la configuración de las funciones ecosistémicas y su organización dentro de un territorio:

Los dos conceptos, ecología y paisaje, están relacionados con el entorno del hombre con la particularmente variada superficie terrestre que este tiene que usar de manera adecuada para su economía agrícola y forestal con el fin de aprovechar las materias primas, al igual que la explotación minera o la fuerza hidráulica que producen energía para impulsar industrias; un entorno natural que el hombre con sus actividades, transforma siempre de un paisaje natural a un paisaje económica y culturalmente aprovechado [5, p72].

La heterogeneidad de la tierra, hace referencia a la estructura a partir de los relieves que generan diferentes tipos de vegetación y se puede dar de dos maneras: Aleatoria cuando se presenta variación gradual sobre el espacio y no se observan los bordes, ni parches o corredores. Heterogénea (los elementos se forman de bordes que se diferencian entre sí manteniendo un patrón estructural.) Turner, citado por Morláns [1], aborda tres conceptos ecológicos que se reflejan en los patrones espaciales y brindan la descripción del orden interno del paisaje. La composición se refiere a los tipos de hábitat y de parches; se expresa en los diferentes tipos de coberturas naturales y antropizadas. La estructura, que la determina la configuración y proporción de los diferentes parches y la función es la forma de interacción de cada elemento en el paisaje.

Por medio de la foto detección y los sistemas de información geográficos se pueden identificar los patrones de ocupación existentes y sus transformaciones a diferentes escalas espaciales. La geomática reúne dentro de sí a varias disciplinas relacionadas con la geografía, teledetección aérea y terrestre, la geodesia, la fotogrametría. Estas disciplinas por sí mismas, generan información muy relevante para la localización de varios fenómenos del planeta. Dicha información puede ser procesada de manera alfa numérica en términos estadísticos, de distribución y reconocimiento de patrones espaciales para la ocurrencia de diferentes cambios en el tiempo (multitemporal), y a través de la geoestadística se pueden establecer patrones espaciales de condiciones medioambientales que permitan la conservación de ecosistemas específicos.

La Geomática, término compuesto por el vocablo *geo*, que significa *Tierra*, y *mática*, *informática* es una disciplina transversal, de corte científico y realmente moderna, que hace referencia a un conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios de información y comunicación para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica, también llamada información espacial o geoespacial.

El análisis de paisajes mediante las tecnologías de los sistemas de información geográfica SIG, permite la implementación de metodologías cualitativas y cuantitativas, así como metodologías mixtas. Esta característica de los SIG beneficia de forma significativa el estudio del paisaje, siendo éste el resultado de una gran composición de elementos presentes en el territorio, los cuales se van transformando por diferentes agentes difíciles de controlar por el hombre, como son, el tiempo, los estados climáticos, la intervención humana en todos sus niveles y sobre todo por su misma naturaleza, al contener elementos vivos en su composición biótica.

Con el propósito sistematizar la información, la estrategia del modelado espacial en el entorno de los SIG facilita la consideración simultánea de múltiples variables y sus interacciones, de cara a comprender el funcionamiento del territorio como un todo y, fundamentalmente, a su evaluación y planificación [6].

2. MÉTODO

2.1 Área de estudio

El área de estudio e interés está delimitada por el Municipio de Medellín, Colombia, con su área rural y urbana, un área aproximada de 382 Km² [7]. El municipio de Medellín está ubicado en el Valle de Aburrá, sector central del departamento de Antioquia, en el cual se estimó para el año 2020, una población de 2.933.094 habitantes, de los cuales 1.596.844 (54.4%) serían mujeres y el 45.6% (1.336.250) hombres [7]. Medellín es reconocida como la segunda ciudad más importante en Colombia y capital del departamento de Antioquia, cuenta con una geografía ricamente variada que le permite tener temperaturas entre los 18° y 24°, ubicada a 1.479 metros sobre el nivel del mar. Su superficie se distribuye en 105 Km² de suelo urbano, 270 Km² de suelo rural y 5,2 Km² de suelo en expansión.

En el área de estudio se distinguen 5 corregimientos ubicados en zona rural y Medellín considerado área urbana, en la Figura 1 se muestra la composición político administrativa del área de Medellín. Esta división político administrativa es conveniente en el momento de analizar el territorio por unidades de paisajes, ya que cada corregimiento reúne un número de características propias y únicas que es preciso mantener agrupadas, por lo tanto, cada una se constituye en una unidad visual de paisaje UVP.

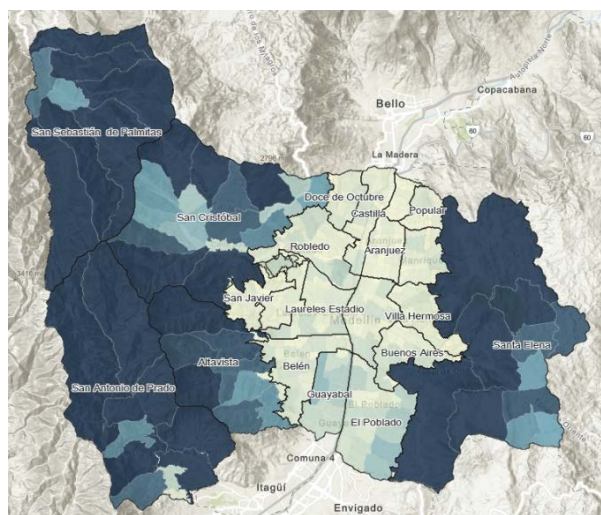


Figura 1. Mapa comunas y Corregimientos de Medellín

Para efectos de organización de la información, se ha designado UVP1- al Corregimiento 50 San Sebastián de Palmitas. UVP2- al Corregimiento 60 San Cristóbal. UVP3- al Corregimiento 70 Altavista. UVP4- al Corregimiento 80 San Antonio de Prado. UVP5- al Corregimiento 90 de Santa Elena. UVP6- a la Zona urbana de Medellín y sus 12 comunas.

Las características que se han agrupado de manera específica de cada una de las unidades visuales de paisaje UVP, son las recogidas en el siguiente cuadro, como Tabla 1. Allí se condensan de cada unidad visual de paisaje, la superficie, el número de habitantes, la densidad poblacional y los pobladores en cada uno de los estratos, aunque el interés está marcado en la población general de cada UVP.

Tabla 1. Aspectos socioeconómicos de las UVP. Estos aspectos han sido tenidos en cuenta para definir la valoración del método multicriterio que se explicará más adelante

Unidad de Paisaje UP	Superficie Km ²	Habitantes h	Densidad h/Km ²
San Sebastián de Palmitas	57.54	8.194	133
San Cristóbal	49.54	112.088	704
Altavista	27.41	40.911	637
San Antonio de Prado	60.4	158.305	1.164
Santa Elena	70.46	15.896	154
Medellín	382	2.529.403	6.643

Adicional a estas características se han tenido en cuenta otros factores que se consideran importantes para definir los patrones de ordenamiento espacial y del paisaje, como son los tipos de vegetación en el área de estudio, actividades comerciales y los usos del suelo. Documentos e instituciones importantes que han servido de apoyo e información valiosa al respecto están Cornare, Área Metropolitana, y los Planes de desarrollo local de los corregimientos PDL, que contribuyen a definir el Plan de Ordenamiento Territorial POT de Medellín.

La plantilla o modelo gráfico que se ha generado del área de estudio que ha permitido el primer análisis perceptual, se ha creado a partir de dos herramientas sencillas, realizadas con el software QGIS. Inicialmente utilizando la herramienta de QuickMapServices y haciendo uso específico de la imagen satelital ofrecida por ESRI Satélite, se ubica el área del estudio, y se crea de forma inicial un mapa ráster del área de estudio. Luego y haciendo uso de la creación de nuevas capas, se crea una capa (*shape*) a partir de la opción de polígono, el cual permite delinear la figura deseada.

Por último, y combinando los dos archivos creados de forma inicial, se corta la imagen del área de estudio específico, obteniendo así el croquis del área de estudio en tiempo real, imagen que sirve de plantilla o modelo para realizar los archivos shape de cada unidad de paisaje. La Figura 2 muestra los distintos mapas obtenidos con esta herramienta. El tiempo en el cual se enmarca el estudio son 4 décadas. Década 1 D1: 1980 a 1990. Década 2 D2: 1991 a 2000. Década 3 D3: 2001 a 2010, Década 4 D4: 2011 a 2020.



Figura 2. Mapas recortados en el software Qgis. Zquierda: Mapa base recortado área de estudio con QGIS. Derecha: Imágenes de los Shape de cada UVP

2.2 Selección de imágenes satelitales

El proceso llevado a cabo en la selección de imágenes de cada una de las décadas en estudio, se realizó con la ayuda de USGS, Google Earth y ESRI. El uso de la plataforma USGS se accede mediante inscripción en el Sistema de Registro EROS (ERS- Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres) del Servicio Geológico de EE. UU. De manera inicial se realizó una búsqueda de imágenes de todos los años, año por año. Una vez descargadas las imágenes se clasificaron por misión de Landsat 5, 7 y 8 maniobra de procesamiento que permitió determinar cuáles eran las imágenes más convenientes, por su calidad, nitidez y poca nubosidad. La Tabla 2 muestra un catálogo de imágenes descargadas, realizado de la década D2 (1991-2000) con su clasificación expuesta.

Tabla 2. Catálogo de imágenes segunda década (1991-2000). En esta década no ha sido posible encontrar imágenes de los años 1994 y 1995

Fecha	Misión	Sensor	Fuente	% cobertura de nubes	ID	Imagen
19910720	Landsat 5	L1TP	USGS	0	LT05_L1TP_009056_19910720_20170126_01_T1	1
19921119	Landsat 4	L1GS	USGS	60	LT04_L1GS_009056_19921119_20170121_01_T2	2
19921221	Landsat 4	L1TP	USGS	50	LT04_L1TP_009056_19921221_20170120_01_T2	3
19930327	Landsat 4	L1GS	USGS	90	LT04_L1GS_009056_19930327_20170119_01_T2	4
19960802	Landsat 5	01T1	USGS	0	LT05_009056_19960802_01T1-SC20_20111822_0829	5
19971024	Landsat 5	01T1	USGS	0	LT05_L1TP_009056_19971024_20161229_01_T1	6
19971024	Landsat 5	01T1	USGS	0	LT05_009056_19971024_01T1-SC20_20111822_1624	7
19980520	Landsat 5	L1TP	USGS	15	LT05_L1TP_009056_19980520_20161225_01_T1	8
19990405	Landsat 5	L1TP	USGS	26	LT05_L1TP_009056_19990405_20161219_01_T1	9
19990710	Landsat 5	L1TP	USGS		LT05_L1TP_009056_19990710_20161217_01_T1	10
20000821	Landsat 7	L1TP	USGS		LE07_L1TP_009056_20000821_20170210_01_T1	11

Para el reconocimiento óptimo de la información contenida en las imágenes, fue primordial el análisis de combinación de bandas, lo que permitió escoger las mejores imágenes de cada década. La combinación de bandas realizado en el software QGIS estuvo centrado en el color natural, el falso color en vegetación, El falso color en zonas urbanas, la vegetación sana, y el contraste entre tierra y agua. Debido a que las imágenes correspondían a los sensores Landsat 5, 7 y 8, la combinación establecida estuvo designada por las siguientes bandas, mostradas a continuación en la Tabla 3.

El grupo de imágenes usados para el análisis de cada imagen por año, surge de la combinación de bandas establecidos. Una buena imagen se considera aquella que da muy buena visibilidad en todas las combinaciones realizadas, como se puede observar en la Figura 3 imagen 1 de 1991 y toda su secuencia de imágenes. La imagen 2 de 1992 se usa como contraste para evidenciar la calidad de una buena y mala visibilidad de los atributos del territorio.

En el contraste mostrado en la Figura 6, se puede ver claramente que la imagen 1 de 1991 muestra mayor claridad en la información contenida en todas las combinaciones de bandas, mientras que la imagen 2 de

1992, posee un porcentaje alto de nubosidad, lo que impide ver claramente la información del territorio. Esto determina que la imagen 2 no es apta para el estudio, por lo tanto, se descarta.

Tabla 3. Combinación de bandas utilizada para las imágenes descargadas Landsat 4, 5, 7, Landsat 8 y Sentinel

	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8	Sentinel 2
Color natural	3-2-1	3-2-1	4-3-2	4-3-2
Falso color-Vegetación	6-5-4	7-4-2	6-5-4	7-4-2
Falso color-Zona urbana	7-6-4	4-5-1	7-6-4	12-11-4
Vegetación Sana	5-6-2	5-4-1	5-6-2	8 ^a -11-2
Tierra-Agua	5-6-4	4-5-3 / 5-4-3	5-6-4	8-4-3

Imagen 1: (1991) LT05_L1TP_009056_19910720_20170126_01_T1

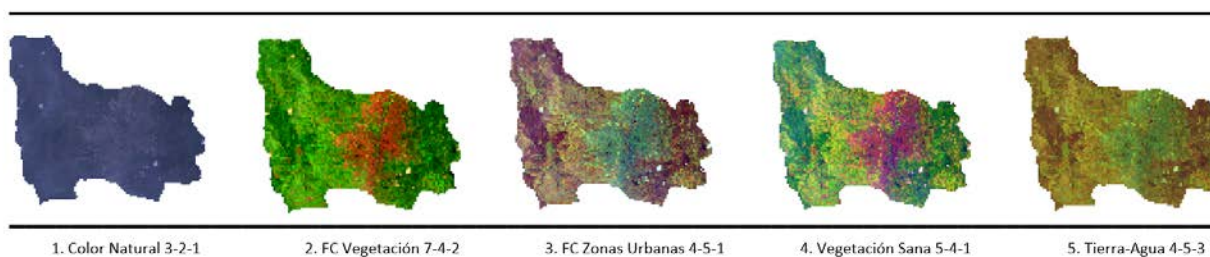


Imagen 2: (1992-1) LT04_L1GS_009056_19921119_20170121_01_T2

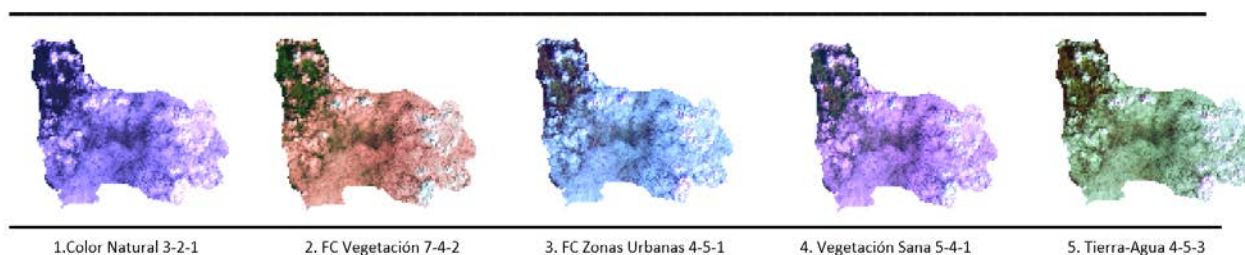


Figura 3. Análisis de combinación de bandas de una imagen satelital del área de estudio para la determinación de la calidad de la información contenida en cada imagen. Todo este proceso fue llevado a cabo con QGis

2.3 Análisis Perceptual del Paisaje

La metodología llevada a cabo en este trabajo de investigación, está basado en la experiencia reportada por la dinámica de valoración, planificación y análisis del paisaje en el Observatorio del Paisaje de Cataluña y el Observatorio del Paisaje de la Red Argentina de Paisaje RAP, llevada a cabo en una de las funciones primarias de los observatorios, que es la elaboración de Catálogos de paisaje territorial. De allí se han retomado bases y dinámicas para la lectura perceptual del paisaje, la valoración de la fragilidad visual del paisaje, evaluación de la calidad visual del paisaje y la exploración del territorio mediante técnicas perceptuales.

En el análisis del paisaje desde la perspectiva perceptual y con metodologías indirectas, cuantitativas y objetivables [8], fueron determinantes otro grupo de variables, como son los patrones de ordenamiento espaciales relacionados con el paisaje. Recordemos que ya se han expuesto otro tipo de variables presentes en el estudio, (UVP, Temporalidad y Patrones). Para este estudio se tuvieron en cuenta los siguientes patrones de ordenamiento del paisaje, acordes con las necesidades del proyecto. La Figura 7 muestra en resumen los patrones escogidos y sus equivalentes.

2.4 Patrones de ordenamiento espacial

Los patrones son secuencias y/o disposición ordenada de cosas que se repiten de manera lógica. La forma organizada en la que se disponen los colores, las formas, las imágenes y en algunos casos los números, son conceptos críticos que en ocasiones se explican mejor a partir de la comprensión matemática de las formas que ellos presentan.

La secuencia puede estar marcada por la continuidad y la sucesión ordenada *Serie o sucesión de cosas que guardan entre sí cierta relación* [9], las sucesiones, series y patrones ayudan a entender e interpretar el mundo desde una mirada lógica. Pero es necesario establecer las diferencias que se pueden encontrar entre una sucesión, una serie y un patrón. Una sucesión es un conjunto de elementos ordenados según un patrón o regla que previamente se ha establecido. Una serie es un conjunto de valores numéricos resultados de una operación matemática, generalmente una sumatoria o acumulación. La serie permite cuantificar los elementos agrupados, mientras que en la sucesión no. Un patrón o regla de formación es lo que permite conocer cómo calcular cada elemento de la serie a partir de la posición del mismo.

Los patrones o entidades que permiten identificar las relaciones existentes en un territorio son muchos, y dependen de las actividades que se den en el uso específico del suelo, sin embargo, para este estudio se han escogido 5 patrones o entidades que se repiten de forma muy variable en el territorio: la vegetación primaria, la vegetación secundaria, los cultivos, la zona urbanizada y la zona rural, mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Patrones escogidos para el primer análisis perceptual de las imágenes

Patrón	Clasificación equivalente
Vegetación primaria	Bosques naturales
Vegetación secundaria	Bosques en transición
Cultivos	Bosques plantados
Zona urbanizada	Zona urbana
Zona Rural	Zona rural

Se denomina vegetación primaria aquella vegetación que se encuentra en su estado natural y sin intervención antrópica. Esta se denomina vegetación en estado de equilibrio dinámico y pueden ser: los bosques naturales. Los bosques naturales agrupan diversos tipos de vegetación, de acuerdo con características geográficas donde se ubican.

Los Cultivos son todos aquellos bosques plantados que corresponden a las áreas de reforestación con especies tanto nativas como exóticas, y cuyo establecimiento puede ser como producto de un proceso productivo o con fines de protección y conservación ambiental. La vegetación secundaria se refiere a los bosques en transición los cuales corresponden a aquellas unidades boscosas que han tenido un intenso proceso de fragmentación por el desarrollo de actividades agropecuarias y se constituyen en objetivos importantes de conservación.

2.5 Generación y definición de métricas e índices

Las métricas, en la ecología del paisaje surgieron para valorar las características espaciales y territoriales de los procesos ecológicos [10], es decir, las métricas son características cualitativas (como la fragmentación, la diversidad, la dominancia, la forma, el aislamiento, la compacidad, elongación, etc.), aquello que observamos y percibimos en el paisaje y de donde se derivan un conjunto de medidas cuantitativas, información codificada a través de los sistemas de información geográfica (SIG), los software y mapeos. Todo esto con el objetivo de concretar unos datos veraces acerca del estado del paisaje que ayudan a sustentar lo observado (características espaciales) y se describe de un paisaje. La Figura 8 muestra las métricas e índices que se tienen planeado estudiar en este proyecto.

Las métricas sirven para concluir acerca de los ecosistemas, información del estado actual, de su modificación a través del tiempo, las repercusiones de las acciones o actividades humanas o para dar una visión y aproximación de lo que podría llegar a cambiar el pasaje en un futuro. Su uso también permite proponer alternativas para aquellas problemáticas presentadas en los territorios como discontinuidades en los corredores bióticos, la migración de fauna, deterioro de la flora nativa, remplazos por vegetación que no es propia de la zona, cambios en el uso del suelo y su utilización puede ser de gran importancia en el ámbito de la planificación territorial.

En efecto, las métricas funcionan con un acercamiento cualitativo inicial al área de estudio, datos que permiten más adelante, ser cuantificados a partir de los índices. La información espacial es susceptible de

ser analizada estadísticamente como cualquier otro tipo de información. Aquí se incursionó en la forma de realizar análisis estadísticos sobre datos espaciales, adaptando los descriptores clásicos a la información espacial. A la hora de clasificar y definir las relaciones espaciales deben considerarse tres enfoques principales: un enfoque netamente matemático, un enfoque psicológico y un enfoque geográfico. Tanto el enfoque matemático como el geográfico son netamente cuantitativos, pero a la hora de comunicar algún tipo de conocimiento espacial que lleve implícita una relación espacial, se hará principalmente de forma cualitativa [11].

A través de la consulta de diferentes tipos de fuentes, se puede llegar a deducir y dar una propuesta para la implementación y la aplicación de las métricas del paisaje en el trabajo investigativo de Aguilera [12], Variaciones en los Patrones de Ordenamiento y Estructura Espacial del Paisaje en Medellín. Es por ello que según la temática de querer abordar cuatro épocas del Municipio de Medellín y estudiar como el paisaje ha cambiado en este tiempo, específicamente en las cuatro décadas que van desde 1980 a 2020; se podría utilizar las propuestas en el trabajo Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada, donde señala al primer grupo de clasificación de las métricas donde hacen parte Geoghegan [13], Alberti y Marzluff [14], Herold [15] y Matteucci y Silva [16].

Por otro lado, en un segundo trabajo realizado por la Universidad Nacional de Colombia, que estudia el paisaje cafetero titulado Conectividad Estructural del Paisaje Cafetero en la Cuenca Alta del Rio San Juan, Suroeste Antioqueño, Colombia se guía del trabajo de la metodología de Marín et al en [17], y utiliza las métricas propuestas por Rutledge [18] y Mcgarigal [19], donde buscan identificar características de composición, configuración, forma y diversidad del conjunto de parches, para estimar la cantidad y la intensidad de las intervenciones antrópicas.

Se da inicio a un estudio más profundo a partir de las métricas, detalladas en la Tabla 5, las cuales son valoraciones cualitativas (nominales o alfabéticos) del paisaje, definiendo las cualidades de sus elementos presentes. Posteriormente, se analizan los índices, los cuales se utilizan para valorar cuantitativamente (numérico) y medir las variaciones de los elementos del paisaje y/o su estructura espacial. Esta etapa de análisis, corresponde a la segunda etapa del proyecto en desarrollo, el cual se lleva cabo actualmente, por lo tanto, aún no se podrían reportar resultados finales.

Tabla 5. Selección de Métricas e Índices del paisaje. Fuente propia 2020

Métricas	Índices
La forma (tamaño, porcentaje, área, dimensión, complejidad)	Desviación típica. (vegetación, población, zona rural, zona urbana, urbanización, cultivos) Dimensión textural. (diámetro de copa, altura del árbol, edad, área basal, diámetro a la altura del pecho).
La composición (teselas, bordes, matriz y parches - Mosaicos)	Medidas sobre la matriz de coincidencias. (homogeneidad, contraste, disimilaridad, segundo momento angular)
La configuración (distancia, proximidad, densidad, fragmentos, conectividad, cohesión)	Autocorrelación espacial. (Índice de Morán)
La diversidad (Riqueza, heterogeneidad, homogeneidad, compacidad, dominancia)	Semi-variograma.

Se puede decir que los índices de vegetación hacen referencia a unos cálculos o medidas cuantitativas para identificar la cantidad de vegetación que hay en un área determinado, para ser más puntuales, el geógrafo Pedro Muñoz Aguayo [20], lo define como *un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado*. Aunque también se tiene en cuenta que los índices *empleados cualitativamente, permiten determinar rápidamente el estado relativo de la vegetación en una zona*. Existen una gran variedad de factores que afectan directamente la producción de biomasa, es aquí donde los índices, pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona o momento. Así los índices, pueden usarse para determinar el efecto sobre la biomasa de sequías, anegamientos, incendios, desmontes, granizo, plagas, o deficiencias nutricionales [21]. Los índices son detallados en la Tabla 5.

Con la información obtenida a partir de los índices, se logran crear mapas, en donde se puede georreferenciar de manera más detallada, la densidad de vegetación que hay en los diferentes lugares de interés como son las UVP. También es importante saber cómo elegir el índice más apropiado, esto depende de las necesidades que se presenten en la zona; no obstante, es necesario valorar distintos aspectos como, tipo de cultivo y parámetros de interés, entre otros. Para entender dichos índices, se debe tener en cuenta que los valores bajos usualmente indican que hay una vegetación poco vigorosa en la zona y, por el contrario, cuando los valores son altos se entiende que la vegetación de ese lugar es muy vigorosa.

El índice de vegetación más común se encuentra inmerso entre el grupo de los índices basados en la pendiente, como es el índice de vegetación normalizado -NDVI- el cual permite conocer el crecimiento y la actividad de la vegetación, donde es muy sencillo el cálculo y disponer de un rango de variación de -1 a 1. Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes, nieve; el suelo desnudo generalmente cae dentro del rango de 0.1 a 0.2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1.

El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0.2 a 0.5 pero, así como el índice de vegetación normalizado es el más utilizado también cabe destacar que tiene una falla y es ser demasiado *sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la planta, lo que limita su potencial de discriminación* [20]. Los valores indican tanto el estado como la abundancia de la cobertura y biomasa de la vegetación verde.

Teniendo en cuenta la información anterior hay que identificar cual índice cumple con el objetivo perseguido, es decir, se han desarrollado una variedad de Índices de Vegetación para ayudar en el monitoreo de la vegetación, según el estudio y la magnitud del proceso se debe indagar y estudiar cuál de los índices existentes puede ser más útil y brindar mayor seguridad en los resultados de la investigación.

De igual forma, con los índices de vegetación se puede conocer que cambios han ocurrido en una zona con el paso de los años sobre los paisajes, es decir, si han ocurrido deforestaciones, pérdida de bosque, fragmentación, degradación forestal y otros. Así mismo, se podrá diferenciar y analizar donde se han creado reforestaciones, hay plantaciones forestales o donde hay bosques nativos; por lo cual se puede realizar un proceso de diagnóstico y/o alerta y de restauración.

El programa QGis cuenta con herramientas idóneas para el cálculo de los índices, como son la calculadora ráster y el software de SAGA GIS (Sistema Automatizado para el Análisis Geo científico), que automatiza el cálculo de diversos índices. Al trabajar con SAGA Gis como complemento se puede calcular el índice de vegetación basados en la distancia o la pendiente, entre otros.

2.6 Metodología de análisis y evaluación multicriterio

Para ese momento de la investigación, se requería avanzar en la definición de cada uno de los patrones en cada UVP, para lo cual fue necesario recurrir al método de valoración multicriterio, esto, debido a la cantidad de variables con las que estaba expuesto el análisis de la información, fue así como se tomaron decisiones a partir de la evaluación o Metodología Multicriterio. La selección de la mejor o mejores opciones para llevar a cabo la solución del problema es un punto crítico en la investigación, en el cual, el análisis multicriterio entra a aportar de forma significativa. En este paso es importante tomar las mejores decisiones y saberlas justificar correctamente. Las decisiones se centran en reducir esfuerzo, tiempo, presupuesto, energía y resultados, hacia la meta que se quiere alcanzar.

El análisis multicriterio implica que existe un problema y un objetivo por cumplir, en el cual participan varios criterios o variables, lo cual, puede llevar a tener o, a contemplar la existencia de varias soluciones diferentes, por lo tanto, se debe elegir, cuál es la mejor alternativa. Para ello es preciso, una etapa de evaluación porque hay que sopesar los pros y los contras de forma racional y sistemática.

Esta metodología es ideal para utilizar con los trabajos en los que intervienen las herramientas SIG, precisamente por la gran cantidad de variables que se presentan. De allí que el análisis multicriterio sea *una*

herramienta de apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación que permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral [22].

En el entorno SIG, el análisis multicriterio se lleva a cabo a partir de dos procedimientos diferentes: 1). El primero que implica una supercapa booleana, por la cual todos los criterios se reducen a declaraciones lógicas de adecuación y luego combinados por uno o más operadores como la intersección (AND) y la unión (OR); 2). El segundo se conoce como combinación lineal ponderada donde los criterios continuos o factores se estandarizan en rango numérico común, y luego se combinan por medio de un promedio ponderado.

La evaluación multicriterio, designada con la sigla EMC, se puede realizar mediante el uso de los SIG con algunas técnicas multicriterio, como el álgebra booleana, la lógica difusa, combinación lineal de ponderado (Calculadora ráster) o el proceso jerárquico analítico (el más utilizado), o por medio de la investigación operativa. La metodología multicriterio permite: Identificar las partes del sistema. Reconocer el peso de las partes del sistema. Identificar los vínculos entre las partes y proponer una solución racional. Los métodos de análisis multicriterio más recomendados son: La combinación lineal ponderada (WLC) y el proceso analítico jerárquico (AHP) con la ayuda de superposición ponderada.

En este trabajo investigativo, se llevó a cabo el método de proceso de análisis jerárquico, desarrollado por Thomas Saaty [23]. Método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones. Como método es una herramienta flexible con el cual se pueden evaluar aspectos cualitativos y cuantitativos, el cual utiliza la escala de fundamentos psicológicos para la evaluación, llamada Escala Saaty la cual se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Escala de Saaty [23]

Escala	Escala Verbal	Explicación
1	Igualmente importante	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre el otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Mucha más preferencia de un elemento sobre el otro. Predominancia demostrada.
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro
2, 4, 6, 8		Intermedio de los valores anteriores

Se define de manera inicial, el objetivo general de la matriz multicriterio, que estará afín al objetivo general de la investigación. De igual manera, se definen los criterios y las alternativas, que para este proyecto se presentan dos niveles de alternativas. Las alternativas por patrones y otro nivel de alternativas por multitemporalidad, basada en las 4 décadas de estudio.

Luego se procede a aplicar el método de valoración de análisis jerárquico. Los criterios escogidos serían las UVP y como alternativas, los patrones de ordenamiento del paisaje de manera estructurada. Estos aspectos y su jerarquía se muestran en el diagrama de la Figura 4, donde se encuentran igualmente detallados la pregunta de investigación y el objetivo general que busca lograrse en este proceso.

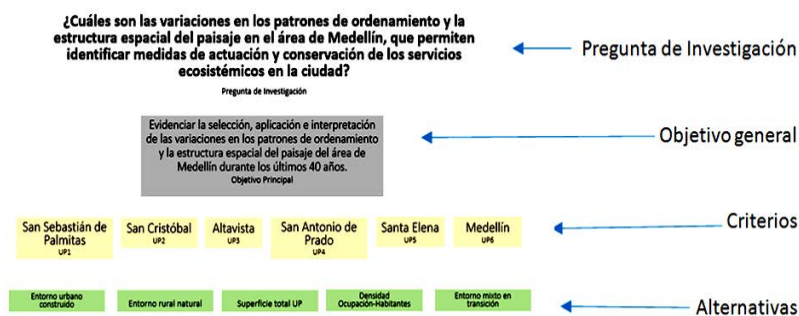


Figura 4. La ponderación entre criterios y la ponderación entre alternativas se comparan. Luego con las ponderaciones de cada criterio y de las alternativas, se saca la priorización. Finalmente, se obtiene el resultado, es decir, la orientación de la decisión que estamos buscando

Es importante tener presente que la combinación de las variables en este método, es fundamental, por lo tanto, la dinámica de aplicación se inicia estableciendo una valoración entre criterios y luego entre alternativas, cada uno por separado, finalmente, se combina la evaluación entre los criterios y las alternativas, todo este proceso se puede expresar de forma gráfica, tal como se muestra en la Figura 5. Y la valoración se realiza basados en los fundamentos psicológicos para las comparaciones pareadas, aportada por Thomas Saaty [23], expuesta en la Tabla 6. De estas combinaciones o valoraciones surge la matriz normalizada y finalmente, la ponderación, que resulta del promedio entre los valores de cada fila, los cuales se priorizan para obtener el resultado y decisión más viable a partir del valor más alto.

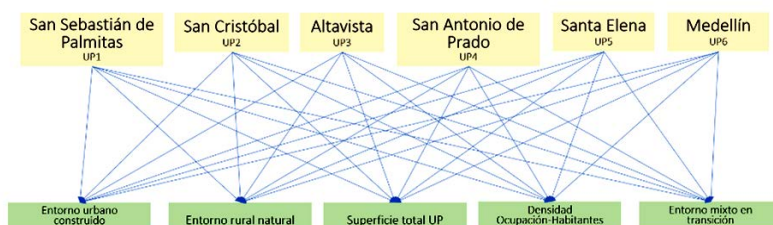


Figura 5. Combinación y/o valoración de criterios y alternativas en la valoración multicriterio

3. RESULTADOS PARCIALES

En la ponderación de criterios la priorización destaca a la UVP1 de San Sebastián de Palmitas, para centrar en este corregimiento, el análisis del paisaje a nivel rural, esto se puede corroborar con los valores expuestos en la Figura 6. En contraste, en la ponderación de alternativas, se destaca la alternativa de entorno urbano y construido como el otro polo al cual debemos remitir el estudio, ya que en este patrón se encuentra la mayor evidencia de transformaciones tanto a nivel urbano como rural, el cual se puede comparar o contrastar con el reporte logrado de la zona rural neta y tener un resultado más confiable.

Ponderación de alternativas		Ponderación de criterios	
	PONDERACIÓN		PONDERACIÓN
Entorno urbano y construido	0.483	San Sebastián de Palmitas	0.337
Entorno rural y natural	0.277	San Cristóbal	0.159
Superficie total UP	0.094	Altavista	0.201
Densidad Ocupación poblacional	0.069	San Antonio de Prado	0.130
Entorno mixto en transición	0.074	Santa Elena	0.087
		Medellín urbana	0.025

Figura 6. Tablas de ponderación. Izquierda: Ponderación de Criterios. Derecha: Ponderación de Alternativas. Resultados obtenidos después de aplicar el método multicriterio

Teniendo en cuenta los resultados parciales en la matriz multicriterio, en esa primera etapa se puede asegurar que, de acuerdo a las necesidades del proyecto de realizar una revisión de las transformaciones en los patrones de ordenamiento y estructura espacial del paisaje de Medellín, es aconsejable analizarlas en el patrón de Entorno urbano y construido en contraste con el análisis de las transformaciones o cambios reflejados en la zona rural de la unidad de paisaje del corregimiento de San Sebastián de Palmitas. Con ello se podría establecer con mayor claridad y precisión dónde están marcados o se han sucedido los cambios en los cuales se debe hacer profundización, o por lo menos, saber por dónde se podría iniciar la indagación de evidencias de los cambios y/o transformaciones.

La ponderación entre criterios y alternativas, reporta como resultado, realizar para todas las unidades de paisaje un análisis centrado en las variaciones del entorno mixto en transición, ya que allí, es donde probablemente estará concentrada la mayor información de las transformaciones del paisaje en el área de Medellín. En la Figura 7, se muestran los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología multicriterio para la ponderación entre criterios y alternativas.

	PONDERACIÓN
Entorno urbano y construido	0.084
Entorno rural y natural	0.089
Superficie total UP	0.361
Densidad Ocupación poblacional	0.231
Entorno mixto en transición	0.978

Figura 7. Tablas de ponderación final entre criterios y alternativas. Resultados obtenidos después de aplicar el método multicriterio

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el análisis visual (cualitativo y cuantitativo), se procede a redactar la interpretación visual, la cual se realiza, en primer lugar, a partir de la percepción de la información gráfica y pictórica representativa de las imágenes para después, valorar los datos. Se debe determinar el nivel de cubrimiento de nubes (nubosidad) y hacer una selección de las áreas a trabajar o intervenir. Al seleccionar el área de estudio se realiza la clasificación de los productos gráficos, estadísticos y digitales relacionados con los patrones de ordenamiento espacial y de paisaje que se están trabajando para luego evaluarse cuantitativamente.

La imagen de la Figura 8, arroja un grupo de tonos en color monocromático codificados, que permiten calificar y cuantificar los diferentes aspectos estudiados. Los colores más claros con mayor valor (de abajo hacia arriba en la tabla de codificación de colores), destacan los puntos y/o lugares con mayor concentración de elementos antrópicos en comparación con los colores más oscuros que delatan los elementos naturales. Es recomendable tener una imagen con muy escasa o nula nubosidad, ya que las nubes se reportarían en color claro lo que afectaría la lectura de los elementos antrópicos, aumentando las variaciones a nivel antrópico y constructivo.

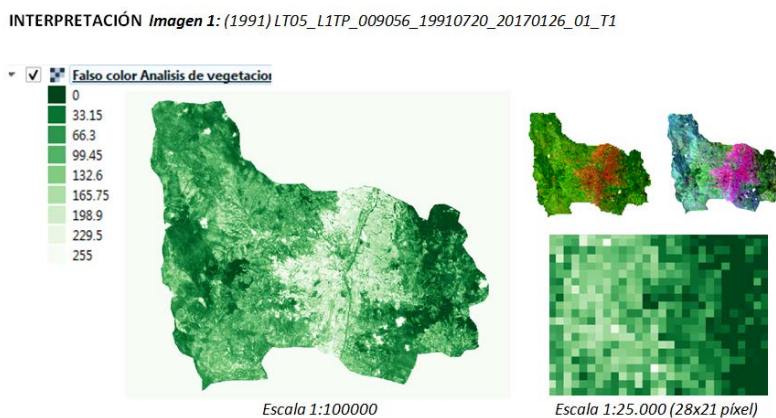


Figura 8. Grupo de imágenes necesarias para la interpretación perceptual y estadística (Cualitativo y cuantitativo)

Se combina la información analizada, con el detalle de un área de píxel para confirmar la saturación o concentración y/o existencia (repetencia) de dicho píxel en el área de análisis. Dependiendo del tamaño del píxel reportado en las imágenes, debido a la escala trabajada, se pueden abordar distintas áreas inclusive la mínima de 5 x 5 píxeles. Es en la variación de los píxeles que representan los elementos en el territorio (cantidad y color), en donde está concentrada la variación y/o transformación que ha sufrido el territorio.

Los SIG se constituyen en una herramienta valiosa y primordial en el análisis como en la interpretación acertada que se haga del reporte gráfico. Son importante los colores, el brillo y la textura de la imagen, permitiendo la diferenciación visual, gráfica y composición de la imagen, así como los datos cuantitativos que reportan la concentración, preexistencia y relación que se está estableciendo entre los distintos elementos de la composición (elementos del paisaje en el territorio), ello depende del valor que le sea asignado a cada píxel [24]. Heralick et al, manifiestan en su libro, que existen 14 características inherentes a las texturas para diferenciarlas y analizarlas de forma más acertada [25].

De manera regular, se contrasta la información del territorio, con mapas protocolizados que permiten establecer estándares o situación del territorio en un determinado tiempo o época. En este caso, ha sido muy útil el mapa de usos del suelo, con información cronológica para sopesar el grado de variación en los usos del suelo en cada una de las unidades de paisaje en estudio.

5. CONCLUSIONES

Acerca del uso y la contribución de los SIG en esta investigación se resalta la importancia del componente visual en la aplicación de este tipo de metodologías de análisis de los paisajes, ya que desde diferentes variables se posibilita la caracterización y determinación del tipo de paisaje que compone el territorio

además de precisar sus cualidades. En este caso, se ha podido analizar la estructura del paisaje de Medellín y se han inferido los procesos de cambio que han tenido lugar.

La aplicación de esta metodología de análisis espacial funciona para la intervención de otros territorios y así tener una mejor planificación urbana y promover la cultura del paisaje de ciudad incluyendo otras derivas. Un ejemplo, es el control que permite realizarse con los índices: el monitoreo de la cobertura vegetal y de uso del suelo, ya sea por las imágenes satelitales y el uso de análisis espacial. Por otra parte, es posible determinar el estado actual del paisaje urbano por medio de las métricas.

No solo para este caso sino para la mayoría de territorios, se puede analizar el estado de los ecosistemas urbanos. En algunos casos se identifica que la mayoría de estos ecosistemas se encuentran en un estado de degradación pero que puede ser de tipo correctivo, es decir, sus componentes pueden rehabilitarse y recuperarse con procedimientos y/o tecnologías adecuadas mediante la implementación de políticas públicas y diferentes estrategias y compromisos locales y nacionales.

La identificación de patrones con sus respectivas variables, permite comprender las relaciones existentes en un territorio y determinar las actividades implementadas en el uso específico del suelo.

Queda clara la importancia de la implementación de este tipo de métodos que cada vez toma más fuerza para realizar estudios en los territorios, ya que se pueden establecer deterioros de los patrimonios naturales, permiten determinar con mayor facilidad las problemáticas y así trazar soluciones, entender complejidades morfológicas y definir qué tipo de vegetaciones ha habido en el suelo a lo largo del tiempo y como estas pueden llegar a ser gradualmente sustituidas con el cambio de las dinámicas de las personas. Las métricas conllevan a codificar la información para así llegar a un análisis visual que permita verificar o descartar datos, ver los cambios de las diferentes categorías de ocupación de suelo tanto en su composición como en su configuración espacial, pudiendo caracterizar mejor la naturaleza de las alteraciones que han tenido lugar a escala regional. Su empleo, permite hasta una comparación de simulaciones de ocupaciones urbanas y de usos del suelo.

Estas métricas han surgido de la necesidad de cuantificar las propiedades de un territorio que afectan a los procesos biológicos y sociales de dispersión y ocupación del espacio, tales como fragmentación de hábitats de vida silvestre, reducción de la cantidad y calidad de hábitat natural, conectividad estructural y funcional, o propiedades estructurales y funcionales de los bordes. Y por último es importante tener en cuenta la escala a trabajar en los estudios de paisaje, ya que, si bien se pueden tomar imágenes del mismo lugar, éstos pueden dar resultados diferentes si se toman escalas distintas.

Recomendaciones

Partimos de considerar el paisaje una porción del territorio en el que confluyen multitud de elementos de distinta naturaleza que interactúan entre sí formando una estructura dinámica (viva) que evoluciona en el tiempo, cambios que pueden ser estudiados con ayuda de los SIG a partir de imágenes satelitales multitemporales.

Tener un monitoreo planeado de la vegetación, aunque no se crea, es de suma importancia en el estudio del paisaje, pues cuando se producen cambios en esta, de forma drástica, se comienzan a ver afectaciones graves a nivel climático y territoriales, lo que a su vez va a ocasionar problemas al paso de los años, incluso pueden aparecer otras complicaciones a la larga, que al día de hoy no se es capaz de imaginar; para ello y como se ha explicado de forma breve, existe una forma de calcular la vigorosidad de la vegetación ya que es importante realizar análisis constantes de la misma y así poder detectar todos y cada uno de los cambios.

Es importante destacar también, que los índices de la estructura del paisaje pueden ser aplicados para monitorear todo el crecimiento y la parte productiva de algunos cultivos, por lo que también puede ser muy útil en la agricultura, el cual favorece la calidad de la producción.

Una vez llevado a cabo un número considerable de actividades en el software QGis, se pueden mencionar ciertas ventajas y desventajas técnicas. De manera inicial, reconocer la accesibilidad del software es

necesario, ya que QGIS es un sistema de información geográfico de software gratuito (open source). El trabajo con el software QGIS permite la interacción en cualquier sistema operativo licenciado o no (GNL/Linux, BSD, Unix, Mac OSX, Windows y Android). Esta ventaja se ve extendida a la facilidad que tienen los estudiantes de descargarlo y aprender sus aplicaciones de forma rápida, debido a la proliferación de tutoriales de muy buena calidad en la web. Su uso es muy similar al software ArcGIS enseñado en la academia y que, debido a su licenciamiento, es más complejo adquirir, lo que hace de QGIS un programa de fácil acceso y necesario.

QGIS está estratégicamente integrado con Geographic Resource Analysis Support System GRASS, también un software SIG bajo licencia General Public License GPL. Soporta información ráster como vectorial y cuenta con herramientas de procesamiento digital de imágenes. Por lo tanto, la combinación de ambos softwares es esencial para el tratamiento digital de imágenes, así como análisis y edición de datos vectoriales, para esta investigación.

Se puede ampliar aún más el uso de QGIS, a partir de los complementos que pueden ser instalados de forma gratuita, en el caso de estudio de esta investigación, el complemento SAGA es de imprescindible utilidad, para el cálculo del índice de vegetación normalizado NDVI – NIR y SAVI. Cálculo que también puede ser realizado con la calculadora ráster del mismo software, aportando otras posibilidades en el contraste de la información.

Las desventajas en el uso de los SIGs que se han podido detectar, dependen mucho del tipo de análisis que se quiera realizar, en este caso con QGIS, como de las técnicas de investigación utilizadas para la interpretación de los procesos realizados. Allí radican los mayores inconvenientes, no tanto porque los procesos del software sean erróneos o no, sino por, introducir malos datos, o realizar inadecuadas interpretaciones de los resultados dados en los procesamientos arrojados por el software. Esto implica un mayor cuidado y supervisión de los datos y resultados por parte de los investigadores, de manera que no se ciñan las interpretaciones a los reportes del software, sino que se recomienda realizar un cotejo pertinente con otro tipo de información complementaria, para corroborar la información y realizar una lectura más fiel al contexto.

REFERENCIAS

- [1] M. C. Morláns. *Estructura del paisaje (matriz, parches, bordes, corredores) sus funciones, fragmentación del hábitat y su efecto borde*. Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca. 2000.
- [2] C. Sánchez Tirado. El análisis sistémico del paisaje como aproximación a los patrones de ordenamiento territorial Mapuche-Lafkenche en el Aijarewe Budi: perspectivas para el reconocimiento y puesta en valor de las lógicas territoriales de nuestros pueblos originarios: cuenca del Lago Budi, región de La Araucanía, Chile. *Trabajo de grado*. 2017.
- [3] Burel & Boudry. *Ecología del paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa. 2002.
- [4] R. T. T. Forman. *Land Mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge. 1995.
- [5] C. Troll. Ecología del paisaje. *Gaceta Ecológica*, núm. 68, 2003, pp. 71-84.
- [6] S. Arias Orozco., D. Ávila Ramírez., E. Rivera Borrayo. La calidad del paisaje costero, a través de sistemas de información geográfica (SIG) hacia el manejo territorial sustentable. Bahía de banderas y Puerto Vallarta- México. *Esto a* No. 8. vol. 5, 2016.
- [7] Alcaldía de Medellín. *Medellín y su población. Primera parte. Generalidades. Documento técnico de soporte POT* (Acuerdo 46/2006). Medellín.
- [8] I. Franch-Pardo y L. Cancero-Pomar. *El componente visual en la cartografía del paisaje. Aptitud paisajística para la protección en la cuenca del río Chiquito. Morelia, Michoacán*. 2016.
- [9] Diccionario Real Academia de la Lengua Española.
- [10] E. J. Gustafson. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What is the State of the Art? *Ecosystems*, N° 1, p. 143-156. 1998.
- [11] V. Olaya. *Sistemas de Información Geográfica*. (Hernandez,1994), Recuperado: https://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Analisis_espacial.html
- [12] F. Aguilera. *Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada*. Universidad de Granada. 2010.
- [13] J. Geoghegan., L.A. Wainger., N.E. Bockstael. Índices de paisaje espacial en un marco hedónico: un análisis de economía ecológica utilizando SIG. *Economía ecológica*, v.23. N° 3, 1997, pp. 251-264.

- [14] M. Alberti., J. M. Marzluff. Resiliencia ecológica en ecosistemas urbanos: vinculación de patrones urbanos con funciones humanas y ecológicas. *Ecosistemas urbanos*, V7, pp. 241-265. 2004.
- [15] M. Herold., N. c. Goldstein., K. C. Clarke. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, N° 86, pp. 286-302. 2003.
- [16] S. D. Matteucci., M. Silva. Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado. *GeoFocus*, N° 5, pp. 180-202. 2005.
- [17] A. L. Marín Valencia., L. J. Restrepo y S. I. Soto. Conectividad estructural del paisaje cafetero en la cuenca alta del río San Juan, suroeste antioqueño, Colombia. *Boletín de ciencias de la tierra*, No. 23, 2008.
- [18] Rutledge, D. Landscape indices as measures of the effects fragmentation: ¿Can pattern reflect process? *DOC Science Internal Series* 98. 27 P. 2003.
- [19] McGarigal, K. y Ene, E. Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, versión 3.3. Oregon State University. 2001.
- [20] P. Muñoz. *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. 2013.
- [21] Towers. *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la Provincia de Loja, Ecuador*. 2002.
- [22] A. Grajales-Quintero., E. Serrato-Moya., H. C. Hahn Von. Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Revista Luna Azul*, No. 36, 2013, pp. 285.
- [23] T. Saaty. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. 1980.
- [24] F. Kayitakire., C. Hamel, C. et al. Recuperación de variables de estructura forestal basadas en análisis de textura de imágenes e Imágenes de IKONOS2. *Teledetección del medio ambiente*, 102, pp. 390-401. 2006.
- [25] R. M. Haralick., K. Shanmugan. et al. Características de textura para la clasificación de imágenes. *Transacciones IEEE en Sistemas, hombre y cibernética*, 3, pp. 610-621. 1973.

Métricas para el proceso de despliegue de sistemas software: Un mapeo sistemático

Pablo Daniel Vázquez¹

Marisa Daniela Panizzi²

Roberto Alfredo Bertone³

^{1,2} *Universidad Tecnológica Nacional*

³ *Universidad Nacional de La Plata*
Argentina

La creciente demanda de productos software de calidad les exige a las organizaciones que desarrollan software el uso de estándares y metodologías que aseguren su entrega con la calidad requerida. La obtención de software de calidad implica realizar controles y mediciones de manera constante durante todas las fases de su desarrollo, con el propósito de conocer su nivel de calidad en cada estadio. En las PyMES desarrolladoras de software de Argentina el proceso de despliegue de sistemas software no se lleva a cabo de manera sistematizada y controlada. La falta de precisión, el error humano, la falta de competencias de los recursos humanos adicionando la falta de comunicación entre los involucrados en el proceso de despliegue, entre otros factores, impactan en el proceso de despliegue generando inconvenientes en su ejecución. En este capítulo se presenta un mapeo sistemático de la literatura SMS para analizar el estado del arte y descubrir si existen métricas para el proceso de despliegue para sistemas software. Se realizó una búsqueda en librerías digitales como IEEE Explore, ACM y SCOPUS, y plataformas abiertas como Google Academic y ScienceDirect. La búsqueda se realizó en el período comprendido entre 2010 y 2020. Al total de 3137 artículos encontrados en la búsqueda, se le aplicó los criterios de selección, resultando 29 artículos relevantes y, finalmente, se analizaron 7 estudios primarios. Como resultado del análisis se pudo identificar que solo dos artículos realizan la propuesta de métricas para el proceso de despliegue, mientras que otros dos hacen uso de métricas como parte del modelo propuesto, y el resto no hace mención del uso de métricas para el proceso de despliegue de software.

¹ Ingeniero en Informática, Especialista en Ingeniería de Sistemas de Información y Magíster (c) en Ingeniería de Sistemas de Información. Ayudante de la Cátedra Sistemas y Organizaciones, se desempeña desde hace 16 años en la industria del software como desarrollador, analista-programador, líder de proyecto y analista de sistemas.

Contacto: vazpablo@gmail.com

² Licenciada en Sistemas, Magíster en Informática y Doctora en Ciencias Informáticas. Categoría IV en el Programa de Incentivos del Ministerio de Educación. Las líneas de investigación son Ingeniería de Software, Educación y Minería de Datos.

Contacto: marisapanizzi@outlook.com

³ Profesor Titular Regular. Ha participado del tribunal de tesis de Maestría en diferentes Universidades y como jurado de concursos docentes. Es miembro del III-LIDI como docente Investigador, Categoría I en el Programa de Incentivos del Ministerio de Educación.

Contacto: pbertone@lidi.info.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de productos software de calidad, exige a las organizaciones que desarrollan software, el uso de estándares y metodologías que aseguren la entrega de dichos productos software con la calidad requerida. En la Ingeniería de Software, existen diversos enfoques de desarrollo de software que priorizan la calidad en el proceso y en el producto obtenido. Estos modelos de calidad presentan factores y métricas que describen las características del software y sus relaciones, las cuales nos permiten identificar fortalezas y debilidades, así como ayudar a controlar y reducir causas significativas de baja calidad, costo o rendimiento [1].

En las últimas décadas, las métricas del software y su proceso de medición asociado han captado la atención de la comunidad de Ingeniería del Software como medio para cuantificar y controlar la calidad del software. De esto resulta importante resaltar en el desarrollo de software, que la calidad no solo se ve reflejada en actividades o tareas. Además, la forma de trabajo del equipo [2], el uso de modelos de calidad y metodologías adecuadas que permitan llevar el control de todas las fases del proceso, buscan reducir costos, evitar retrasos en la planificación, mejorar el tiempo de dedicación y aumentar la calidad en el desarrollo de software, permitiendo mejorar la competitividad de las organizaciones [3].

Aun así, Eisty et al. [4] concluyen que la comunidad de desarrollo de software tiene un conocimiento general de las métricas. Sin embargo, su conocimiento de métricas específicas es deficiente y su uso aún más limitado. También obtuvieron como resultado de su trabajo, que las métricas más utilizadas están relacionadas con el rendimiento y las pruebas.

Fuggetta et al. [5] mencionan algunos aspectos del proceso de software que fueron evolucionando en las últimas dos décadas. Estos aspectos se corresponden a: aspectos sociales, como, por ejemplo, el Manifiesto Ágil, la Ingeniería de Software Global GSE, la Ingeniería de Software Empírica, la Ingeniería basada en Modelos, las suites de administración del ciclo de vida de la aplicación ALM y, finalmente, la automatización de procesos, entre ellos: la administración de configuración, el aseguramiento de la calidad, las pruebas del software y Development and Operations DevOps. Además, mencionan que, la comunidad de investigadores tiene en cuenta que las posibilidades de automatizar completamente los procesos de modelado y ejecución se limitan a aspectos y fases específicos, como la generación de código, las pruebas, el empaquetado, el despliegue y la gestión de la operación de los productos finales.

En Argentina, la industria del software se compone mayoritariamente por Pequeñas y Medianas Empresas PyMES, representando casi el 80% del sector, lo que constituye un eslabón fundamental en el sector, para el país y refuerza la necesidad de llevar adelante iniciativas que contribuyan con el desarrollo y mejora de competitividad de dichas empresas [6].

El proceso de despliegue contiene prácticas que generan problemas, como lo son la falta de componentes, descargas incompletas o despliegues erróneos [7], que puede llevar mucho tiempo, ser desorganizada y ser muy costosa [8]. Los problemas que ocurren en la fase de despliegue se transfieren y eventualmente resuelven como parte de la fase de mantenimiento. Algunas empresas suelen tardar meses y hasta años, dependiendo de la complejidad del software, en lograr finalizar el despliegue de un sistema de software en su totalidad. Por causa de estos problemas, un despliegue de software eficiente ahorrará considerablemente recursos en términos de costo y esfuerzo [9]. Otras de las cuestiones con las que se debe lidiar en el proceso de despliegue, es la limitación de recursos tecnológicos, en particular su distribución, heterogeneidad y dinámica. En algunas ocasiones, se debe reaccionar ante fallas y variaciones en la calidad de los recursos sin olvidar satisfacer los requisitos de los interesados. Por lo tanto, el despliegue debe ser un proceso adaptable, pero sin perder el foco de satisfacer los requisitos del proyecto [10].

Yim [11] menciona que muchas de las fallas que se producen durante el proceso de despliegue son causadas por errores humanos. Estas las clasifica según su origen en cinco tipos: nueva información, supervisión, comunicación, educación y desatención. Y el grado en que cada una de estas afectan al proceso de despliegue, también se ve afectado en gran medida por las personas, el procedimiento y la infraestructura de cada equipo de ingeniería.

El proceso de despliegue de sistemas de software se lleva a cabo de manera no sistematizada en la mayoría de las empresas. La falta de precisión en este proceso provoca fallas durante el funcionamiento del sistema que, según la gravedad de éstas, llevan a la eliminación del software [12] Estas dificultades se relacionan con el entorno en el que se distribuyen o simplemente debido a la cultura organizacional [13].

Por todos los inconvenientes enunciados anteriormente y con el propósito de incrementar la calidad y capacidad del proceso de despliegue, se decidió como objetivo de investigación a largo plazo, proponer un conjunto de métricas para el proceso de despliegue de sistemas de software que ayude a las PyMES a la toma de decisiones frente a los desvíos que puedan detectarse, así como ayudar a las empresas a optimizar su proceso de despliegue.

Antes de comenzar con el diseño de las métricas para el proceso de despliegue, se realizó un mapeo sistemático de la literatura (SMS) para analizar el estado del arte y descubrir si existen métricas para el proceso de despliegue para sistemas de software. Para realizar el SMS se siguieron los lineamientos propuestos por Kitchenham et al. [14] y por Petersen et al. [15].

2. MÉTODO

2.1 Planificación del SMS

En esta sección se presenta la definición del protocolo del SMS: preguntas de investigación PI, estrategia de búsqueda, selección de los estudios, criterios y proceso de selección, formulario de extracción y el proceso de síntesis de los datos. El objetivo de este SMS es responder la siguiente pregunta de investigación (PI): *¿Se hace uso de métricas durante el proceso de despliegue de sistemas de software?* Esta pregunta principal se descompone en un conjunto de sub-preguntas (PI1-3), las cuales se presentan en la Tabla 1 junto a la motivación de cada una de ellas MO1-3.

Tabla 1. Preguntas de investigación PI y motivación MO

Ref.	Preguntas	Ref.	Motivación
PI1	¿Qué contribuciones existen para la mejora del proceso de despliegue?	MO1	Determinar que contribuciones existen para la mejora del proceso de despliegue.
PI2	¿Cuáles son los atributos o factores de calidad más estudiados para el proceso de despliegue?	MO2	Descubrir sobre qué factores o atributos se centran las métricas propuestas.
PI3	¿Qué tipo de investigaciones se utilizan?	MO3	Identificar los tipos de investigación de los estudios primarios según la clasificación de Wieringa R. [16], en concordancia con los tipos de investigación recomendados por Petersen [15, 17].

Se decidió realizar una búsqueda automática en las librerías y plataformas digitales descritas en la Tabla 2, se consideraron artículos de congresos y artículos de revistas. La búsqueda se realizó en el período comprendido entre el año 2010 hasta diciembre del año 2020. Se decidió para el año de inicio de la búsqueda, el 2010 por tratarse de un año relevante dado que la aparición de tendencias y desafíos en ese momento tuvieron un impacto en los procesos de software.

Entre estos, podemos mencionar el Desarrollo Global de Software e Internet como entorno de desarrollo, una infraestructura arquitectónica y de ejecución y una infraestructura básica de distribución y negocios, lo que implica un cambio en los procesos de construcción de software y en el modo de operación de los sistemas software, con la aparición del software móvil [5].

Tabla 2. Bibliotecas y repositorios digitales utilizadas

Bibliotecas/Repositorios/Plataformas	Opciones
Google Academic	Artículos de congresos, artículos de revistas
SCOPUS	Artículos de congresos, artículos de revistas
Biblioteca digital de ACM	Artículos de congresos, artículos de revistas
IEEE Xplore	Artículos de congresos, artículos de revistas
ScienceDirect	Artículos de congresos, artículos de revistas

En una primera instancia y como mecanismo de prueba de las librerías y plataformas digitales, se realizó una búsqueda piloto con la cadena que se encuentra en la Tabla 3. Esta cadena se debió adaptar para algunas librerías, dado que su formato y longitud no permitían realizar búsquedas, además de devolver artículos que no resultaron relevantes para la investigación. Los términos se emplearon en el idioma inglés.

Tabla 3. Cadena de la búsqueda piloto

Cadena de la búsqueda piloto
("software system" OR "software" OR "software application" OR "computer software") AND ("deployment" OR "transition") AND ("metric" OR "metrics" OR "measurement" OR "Quality metric" OR "indicator")

La Tabla 4 presenta las cadenas definitivas para la búsqueda de acuerdo con la librería o repositorio.

Tabla 4. Cadenas de búsqueda definitiva

Biblioteca/Repositorio	Cadena
	Con todas las palabras: deployment metrics 1. Con al menos una de las palabras: "software system" OR software OR "software application" OR "computer software" OR deployment OR transition OR metric OR metrics OR measurement OR "Quality metric" 2. Con al menos una de las palabras: "software system" OR software OR "software application" OR "computer software" OR deployment OR transition OR metric OR metrics OR measurement OR "Indicator"
GoogleAcademic	Artículos fechados entre 2010 y 2020 Cadenas finales: allintitle: deployment metrics "software system" OR software OR "software application" OR "computer software" OR deployment OR transition OR metric OR metrics OR measurement OR "Indicator" allintitle: deployment metrics "software system" OR software OR "software application" OR "computer software" OR deployment OR transition OR metric OR metrics OR measurement OR "Quality metric" Debido a una limitación del buscador en relación a la cantidad de conectores admitidos dentro de una cadena de búsqueda, la cadena original se debió ejecutar en dos partes.
SCOPUS	(TITLE ("software system" OR "software" OR "software application" OR "computer software") AND TITLE-ABS-KEY ("deployment" OR "transition") AND TITLE-ABS-KEY ("metric" OR "metrics" OR "measurement" OR "Quality metric" OR "indicator")) AND DOCTYPE (ar OR cp) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2021 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP"))
Librería digital de ACM	[[Abstract: "deployment"] OR [Abstract: "transition"]] AND [[Abstract: "software system"] OR [Abstract: "software"] OR [Abstract: "software application"] OR [Abstract: "computer software"]] AND [[Abstract: "metric"] OR [Abstract: "metrics"] OR [Abstract: "measurement"] OR [Abstract: "quality metric"] OR [Abstract: "indicator"]] AND [Publication Date: (01/01/2010 TO 12/31/2020)]
IEEE Xplore	(("Title": "software system" OR "software" OR "software application" OR "computer software") AND ("Title": "deployment" OR "delivery" OR "transition" OR "implantation") AND ("Title": "metric" OR "metrics" OR "measurement" OR "Quality metric" OR "indicator"))
ScienceDirect	("software system" OR "software" OR "software application" OR "computer software") AND ("deployment" OR "transition") AND ("metric" OR "metrics" OR "measurement" OR "Quality metric") Date: 2010 to 2020 Article type: Research article Subject areas: Engineering Publication Title: Journal of Network and Computer Applications, Procedia Engineering, Computer Networks.

Los criterios de inclusión y exclusión utilizados para el proceso de selección se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión
Artículos del 2010 hasta diciembre del 2020.
Artículos en el idioma inglés.
Artículos que contengan cadenas candidatas en el título, palabras clave y/o en el resumen.
Artículos duplicados: si hay varios artículos de un mismo autor que contemple la misma investigación, se considerara el más completo.
Criterios de exclusión
Artículos que no cumplan los criterios de inclusión.
Estudios que no cuenten con resultados claros.
Artículos a los cuales no se tiene acceso.

Es importante mencionar que si bien el método del SMS propuesto en [14, 15] sugiere que la búsqueda debe realizarse sobre metadatos homogéneos en las librerías digitales, dada la diversidad de librerías digitales y plataformas empleadas (en abierto o por suscripción), se debió realizar la búsqueda combinando los metadatos considerando en algunos casos el título, las palabras clave y en otros el título y/o resumen.

El proceso de selección de los estudios consistió en los siguientes pasos: 1) realizar la búsqueda en las fuentes definidas aplicando la cadena en el título y/o en el resumen, 2) eliminar los artículos duplicados, 3) aplicar los criterios de inclusión y exclusión en el título, resumen y palabras clave, 4) aplicar los criterios de inclusión y exclusión al texto completo. Este proceso permitió la selección de los estudios primarios que se analizaron para dar respuesta a las preguntas de investigación PI formuladas.

Para dar respuesta a cada una de las preguntas de investigación PI se definió un esquema de clasificación. Algunas de las categorías del esquema de clasificación se definieron durante la planificación del SMS, otras surgieron a partir de la lectura del artículo completo. La descripción de las categorías utilizadas en el esquema de clasificación se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Esquema de clasificación de estudios primarios

Dimensión	Categorías
Contribución	Los tipos de contribución se ha realizado a nivel académico acerca del proceso de despliegue de sistemas de software son los siguientes: métricas, algoritmos, métodos, modelos, frameworks.
Factores	Los factores o atributos de calidad en los cuales se centran las métricas propuestas son los siguientes: Costo, esfuerzo, confiabilidad, eficiencia, Otros, No informa.
Tipos de Investigación	Los tipos de investigación de los artículos son: investigación de evaluación, artículo filosófico, propuesta de solución, investigación de validación, reporte de experiencia personal, artículo de opinión. Se utilizó la clasificación de tipos de investigación propuesta por Wieringa et al. en [16].

El formulario de extracción de datos de la Tabla 7 se compone de dos partes: la primera se refiere a los metadatos de cada uno de los estudios primarios y la segunda a cada pregunta de investigación.

Tabla 7. Formulario de extracción de datos

Metadatos	Id Artículo, Año, Título, Autor/es, Nombre de la publicación, Tipo de publicación (revista o congreso), Fuente, Origen de búsqueda, Palabras clave.
PI/Dimensión	Categorías
PI1/Contribución	Métrica, Algoritmo, método, modelo, framework.
PI2/ Factores o Atributos de calidad	Costo, esfuerzo, confiabilidad, eficiencia, Otros, No informa.
PI3/ Tipos de investigación	Investigación de evaluación, artículo filosófico, propuesta de solución, investigación de validación, reporte de experiencia personal, artículo de opinión. Se utilizó la clasificación de tipos de investigación propuesta por Wieringa <i>et al.</i> en [10].

Para dar respuesta a las preguntas de investigación PI definidas en el protocolo, se utiliza una síntesis temática basada en el esquema de clasificación que se representará a través de tablas y gráficos.

2.2 Ejecución del SMS

En esta subsección, se presenta la búsqueda realizada en las librerías y plataformas digitales, la selección de estudios primarios de acuerdo con lo definido en el protocolo de revisión del SMS. Se aplicó la cadena de búsqueda en las librerías definidas en la estrategia de búsqueda (Tabla 2). De un total de 3137 artículos obtenidos tras aplicar los criterios de selección, se detectaron 29 artículos relevantes y de estos, finalmente se analizaron 7 artículos primarios.

La selección de los estudios primarios ha sido realizada por el tesista en formación respetando el proceso de selección definido en el protocolo de revisión. En paralelo, la directora de tesis replicó el proceso de selección para la obtención de estudios primarios. Los dos conjuntos de estudios primarios se validaron por el tesista y los directores, se discutieron las discrepancias con el propósito de determinar que artículos eran apropiados de incluir o no en el estudio. Finalmente, luego de aplicar el proceso de selección, se consideraron 7 estudios primarios para su análisis con el propósito de dar respuesta a las preguntas de investigación definidas.

Con el propósito de incrementar la cantidad de artículos relevantes, se aplicó el método *bola de nieve* (*snowballing*) de acuerdo con los lineamientos sugeridos por Wohlin [18]. Este especifica que, una vez que se identifica un estudio primario en una de las fuentes de búsqueda, se explora de manera recursiva las referencias del estudio utilizando los mismos criterios definidos para la búsqueda. Finalmente, luego de aplicar el método “*bola de nieve*” no se encontró ningún artículo para ser considerado en el análisis. La lista completa de los estudios primarios seleccionados se encuentra en la Tabla 8.

Tabla 8. Listado de estudios primarios

	Estudio Primario
[EP1]	Soner, S., Jain, A., Saxena, D. (2010). Metrics calculation for deployment process. 2010 2nd International Conference on Software Technology and Engineering.
[EP2]	Xia, T., Bhardwaj, S., Dmitriev, P., & Fabijan, A. (2019). Safe Velocity: A Practical Guide to Software Deployment at Scale using Controlled Rollout. 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP). doi:10.1109/icse-seip.2019.00010.
[EP3]	Dubois, D. J., Trubiani, C., Casale, G. (2016). Model-driven application refactoring to minimize deployment costs in preemptible cloud resources. In 2016 IEEE 9th International Conference on Cloud Computing (CLOUD) (pp. 335-342). DOI 10.1109/CLOUD.2016.50.
[EP4]	Su, X., Liu, H., Wu, Z., Zuo, D., Yang, X. (2010). SA based software deployment reliability estimation: Problem space, challenges and strategies. IEEE 2010 International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT). doi:10.1109/iceit.2010.5607510.
[EP5]	Lehtonen, T., Suonsyrjä, S., Kilamo, T., Mikkonen, T. (2015). Defining metrics for continuous delivery and deployment pipeline. SPLST.
[EP6]	Wan, X., Guan, X., Wang, T., Bai, G., Choi, B. (2018). Application deployment using Microservice and Docker containers: Framework and optimization. Journal of Network and Computer Applications, 119(), 97-109. doi:10.1016/j.jnca.2018.07.003
[EP7]	Rodrigues, G., Guimaraes, F., Rodrigues, G., Knauss, A., Joao Paulo C. de Araújo, J., Andrade, H., Ali, R., (2019). GoalD: A Goal-Driven Deployment Framework for Dynamic and Heterogeneous Computing Environments. Information and Software Technology. doi: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.04.003

2.3 Síntesis del SMS

En la Tabla 9 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos del análisis de los estudios primarios presentados en la Tabla 8, de acuerdo con el esquema de clasificación definido en la Tabla 6.

Tabla 9. Resultados por preguntas de investigación PI

Referencia	Resultados por cada PI		
	Contribución (PI1)	Factor/Atributo de calidad (PI2)	Tipos de investigación (PI3)
[EP1]	Métricas	Esfuerzo.	Proponer una solución.
[EP2]	Modelo.	Esfuerzo. Confiabilidad.	Evaluación.
[EP3]	Modelo.	Costo.	Validación.
[EP4]	Modelo.	Confiabilidad.	Proponer una solución.
[EP5]	Métricas.	Esfuerzo.	Evaluación.
[EP6]	Algoritmo y framework.	Costo.	Validación.
[EP7]	Framework.	Esfuerzo.	Validación.

2.3.1 PI1: ¿Qué contribuciones existen para la mejora del proceso de despliegue?

Soner et al. [EP1] exponen factores que afectan al proceso de despliegue, como la cobertura del proceso, capacidad de cambio del proceso, coordinación entre procesos y abstracción de políticas de despliegue. Para minimizar estas dificultades presenta tres métodos para el cálculo del costo y el esfuerzo del proceso de despliegue. El primero se basa en un porcentaje fijo del esfuerzo del proceso de desarrollo. En el segundo método, el cálculo del esfuerzo se basa en la garantía de calidad, la prueba de aceptación del usuario y la producción. Finalmente, el último método que presenta se basa en la experiencia.

Con el propósito de ayudar a las empresas a optimizar sus prácticas de despliegue de software, Xia et al. [EP2] presentan un modelo híbrido entre experimentación controlada y lanzamiento por fases, a las cuales llama anillos. A este modelo lo denomina despliegue controlado. En su trabajo enuncia las estrategias para diseñar y organizar métricas de despliegue, para decidir la duración de la implementación y las estrategias para el diseño y la toma de decisiones en anillos individuales.

Dubois et al. [EP3] hacen uso de la evaluación de modelos de Redes de colas como métrica de costos que se relaciona con el tiempo de procesamiento para optimizar los costos de ejecución de aplicaciones en la nube, con el fin de minimizar el costo de su despliegue requiriendo menos capacidad computacional y menos recursos.

Su et al. [EP4] basan su investigación en los desafíos para la estimación de la confiabilidad en el despliegue de software basado en arquitectura de software. Como propuesta, presentan y discuten los 17 parámetros propuestos para el cálculo de la confiabilidad.

Lehtonen et al. [EP5] realizan la propuesta de métricas para un proceso de despliegue continuo. El objetivo de las métricas que propone es proporcionar información valiosa al equipo que les permita mejorar el proceso de automatización del despliegue de software.

En Wan et al. [EP6] se propone un framework de comunicación y un algoritmo de asignación de recursos escalable para minimizar el costo del despliegue de la aplicación en entornos de computación en la nube.

El modelo que proponen Rodrigues et al. [EP7] propone un framework para abordar sistemáticamente el despliegue autónomo en entornos informáticos dinámicos y muy heterogéneos.

2.3.2 PI2: ¿Cuáles son los atributos o factores de calidad más estudiados para el proceso de despliegue?

A través de la propuesta de métricas que realizan Soner et al. [EP1] buscan calcular el esfuerzo del proceso de despliegue de software.

Xia et al. [EP2], con su propuesta de despliegue controlado, no solo buscan optimizar cada una de las fases de despliegue, sino también maximizar la confiabilidad del producto final frente al usuario final.

El modelo de Dubois et al. [EP3] permite optimizar los costos de ejecución de aplicaciones en la nube, con el fin de minimizar el costo de su despliegue.

Su et al. [EP4] presentan y discuten los 17 parámetros propuestos para el cálculo de la confiabilidad en el despliegue de software basado en arquitectura de software.

Lehtonen et al. [EP5] realiza la propuesta de métricas con el propósito de optimizar la automatización del proceso de despliegue de software.

Wan et al. [EP6] proponen un framework y un algoritmo con el objetivo de optimizar los costos del despliegue de las aplicaciones.

Rodrigues et al. [EP7] proponen un framework que busca optimizar los costos de despliegue de las aplicaciones.

2.3.3 PI3: ¿Qué tipo de investigaciones se utilizan?

De los estudios primarios analizados, dos corresponden a la categoría propuesta de solución, tres a la categoría *validación* y dos corresponden a la categoría *evaluación*.

Soner et al. [EP1] en su trabajo proponen una idea sobre el procedimiento de despliegue, los factores que deben seguirse y algunos métodos mediante los cuales se puede calcular fácilmente el esfuerzo de despliegue. Su et al. [EP4] describen qué información constituye el modelo de confiabilidad de implementación de software basado en arquitectura de software, detallan los desafíos para obtener la información disponible para el modelo y enuncian cómo afrontar esos desafíos.

Dentro de los estudios en los que se realizan evaluaciones en el contexto industrial, se encuentra el de Xia et al. [EP2], en su investigación, presentan el despliegue controlado, que aplica la experimentación

controlada, experimentos simultáneos con diferentes variaciones del mismo producto a cada etapa de un despliegue por fases tradicionales. Este consiste en despliegues para audiencias más pequeñas antes de implementarlos de forma generalizada.

Para evaluar la efectividad del despliegue controlado se presenta un estudio de caso en Microsoft Corporation en los EE. UU. entre julio de 2017 y agosto de 2018. Durante este período se examinaron cientos de experimentos controlados. Lehtonen et al. [EP5] que llevaron a cabo un estudio de caso único industrial para identificar qué datos son creados automáticamente por las diversas herramientas en la automatización del despliegue. Los resultados obtenidos mostraron que muchas métricas útiles se generan automáticamente. Basándose en esos datos, definieron nuevas métricas para describir las propiedades de la canalización del despliegue las cuales fueron discutidas con el equipo de desarrollo del proyecto de caso.

Dentro de los artículos en los que se realizan validaciones de las soluciones, se encuentran Dubois et al. [EP3] que realizan la validación de su propuesta de modelo bajo diferentes escenarios inspirados en un sistema real. Los resultados que obtuvieron manifiestan que reduce los costos de implementación, hasta en un 60% en comparación con el mismo modelo, pero sin refactorización de aplicaciones impulsada por modelos. Wan et al.

[EP6] se propone una validación de su propuesta mediante comparaciones con tres estrategias existentes en Docker Swarm utilizando trazas reales de Google Cluster. Demuestran que el framework y el algoritmo propuesto proporcionan más flexibilidad y ahorran más costos que las estrategias existentes. Y, por último, para validar la escalabilidad de su propuesta, Rodrigues et al.

[EP7] diseñaron escenarios que reflejan las incertidumbres inherentes de los sistemas autoadaptativos. Los resultados de la validación demuestran la utilidad y escalabilidad de GoalD en la planificación de la implementación de un escenario razonablemente grande en solo unos pocos milisegundos.

2.3.4 Hallazgos adicionales

En esta sección se presenta la clasificación de los estudios primarios seleccionados por diferentes aspectos, como artículos encontrados por evolución anual de publicaciones, foros de publicación, los países que más aportan y el contexto donde se realizaron los estudios (académico o en la industria).

La Figura 1 ilustra la evolución del número de artículos a lo largo del tiempo. Aun observando que los años 2010 y 2019 presentan los picos más altos de publicaciones, ambos años con dos artículos cada uno, no es posible determinar una tendencia clara sobre el tipo de contribución de los estudios. La mayoría de los artículos encontrados fueron publicados en congresos, lo que representa el 71% (5 estudios) del total, y las publicaciones en revistas el 29% (2 estudios), como se muestra en la Figura 2. Respecto al evento donde los artículos fueron publicados, se encontró que existe una gran diversidad de congresos y revistas.

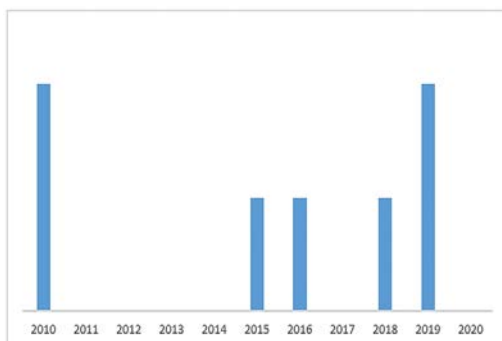


Figura 1. Cantidad de artículos por año

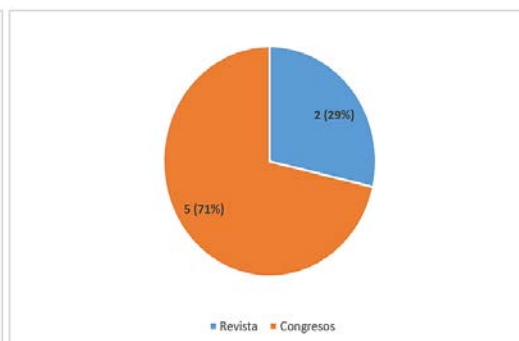


Figura 2. Cantidad de artículos por tipo de publicación

La Tabla 10 sintetiza los estudios primarios por librería digital utilizada (Scopus, IEEE Xplore o ACM) o plataformas abiertas (Google Academic y ScienceDirect), título de publicación, tipo de publicación (conferencia o revista) y año. El mayor número de estudios se encontró en IEEE Xplore.

Tabla 10. Estudios primarios por librería digital o plataforma abierta, título de publicación, tipo de publicación y año

ID Artículo	Fuente	Título de publicación	Tipo de Publicación	Año
[EP1]	IEEE	2nd International Conference on Software Technology and Engineering	Conferencia	2010
[EP2]	IEEE	IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)	Conferencia	2019
[EP3]	IEEE	IEEE 9th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)	Conferencia	2016
[EP4]	IEEE	International Conference on Educational and Information Technology	Conferencia	2010
[EP5]	Google Académico	14th Symposium on Programming Languages and Software Tools.	Conferencia	2015
[EP6]	ScienceDirect	Information and Software Technology	Revista	2018
[EP7]	ScienceDirect	Journal of Network and Computer Applications	Revista	2019

Otro análisis realizado corresponde al país donde se originaron las publicaciones. Se identificó que los orígenes se encuentran muy dispersos, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Síntesis por país

ID Artículo	País	Cantidad
[EP6][EP7]	United Kindom	2
[EP1][EP3]	USA	2
[EP2]	Canada	1
[EP4]	China	1
[EP5]	Finlandia	1

En la Tabla 12 se puede observar que cinco de estos estudios pertenecen al campo académico, mientras que un estudio es desarrollado por la academia y la industria, así como también uno solo por la industria.

Tabla 12. Síntesis por contexto

Contexto de estudio	Cantidad	ID Artículo
Académico	5	[EP1][EP3][EP4][EP6][EP7]
Industria	1	[EP2]
Académico e Industria	1	[EP5]

3. AMENAZAS A LA VALIDEZ

En este apartado analizamos las potenciales amenazas a la validez que podrían afectar a nuestro estudio, con respecto a las cuatro categorías sugeridas por Wohlin et al. [19].

- *Construir validez.* En este SMS, con el fin de mitigar estas amenazas, describimos el significado que le hemos dado al proceso de despliegue del sistema de software, basado en estándares y metodologías reconocidas internacionalmente [20-22].
- *Validez interna.* Para mitigar las preocupaciones sobre la validez interna, el primer autor creó un protocolo de revisión como parte de la investigación de su tesis de Maestría, y esto fue revisado por los otros dos autores.
- *Validez externa.* Se tomó la decisión de utilizar tres motores de búsqueda en nuestra búsqueda de las revistas y actas de congresos que son relevantes y recomendados para el campo de la ingeniería de software y complementar con dos plataformas abiertas reconocidas por la comunidad científica. No se consideró la literatura gris, como los artículos disponibles en forma de resúmenes, presentaciones, tesis doctorales o libros, porque incluirlos podría haber afectado la validez de nuestros resultados.
- *Fiabilidad.* Se intentó mitigar el sesgo de las publicaciones definiendo cuidadosamente: a) los criterios de inclusión y exclusión para poder seleccionar estudios primarios, y b) los criterios de exclusión

específicamente, con el fin de seleccionar reglas basadas en las preguntas de investigación predefinidas en el trabajo. Para aumentar la confiabilidad, el primer autor aplicó los criterios con la ayuda de la segunda autora cada vez que se presentaba algún desacuerdo con respecto a la inclusión o exclusión de una regla. Paralelamente, la segunda autora replicó el proceso de selección y se obtuvo un segundo conjunto de estudios primarios. Los dos conjuntos de estudios primarios fueron validados por los tres autores; se discutieron las discrepancias entre ellos, con el propósito de determinar si era apropiado incluir un artículo en particular o no, y de ese modo se obtuvo el listado final de estudios primarios. Además, se diseñó un formulario para la registración de los datos con Excel y se mapearon las preguntas de investigación de acuerdo con el esquema de clasificación definido para cumplir con los objetivos de este estudio. Se considera que el efecto potencial de este sesgo tiene menos importancia en estudios de mapeos sistemáticos que en las revisiones sistemáticas de literatura. Para corroborar aún más el proceso de búsqueda, se aplicó el método *snowballing*, pero desafortunadamente no permitió encontrar más estudios primarios que los hallados en la búsqueda inicial.

Para fortalecer la confiabilidad, luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se creó una matriz con las propiedades de los datos extraídos de los artículos y se los mapeó con las preguntas de investigación con el motivo de cumplir con el objetivo de este estudio. Se estima que el efecto potencial de este sesgo tiene menos importancia en los estudios de mapeo que en las revisiones sistemáticas de literatura. Para dar más sustento al proceso de búsqueda, se aplicó el método de bola de nieve, pero desafortunadamente no nos permitió encontrar más estudios primarios que los encontrados en la búsqueda inicial.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un mapeo sistemático de la literatura para analizar el estado del arte y descubrir si existen métricas para el proceso de despliegue. Se seleccionaron 7 estudios primarios relevantes de un conjunto inicial de 3137 artículos resultantes de la búsqueda realizada en SCOPUS, IEEE Xplore, ACM, Google Academic y ScienceDirect en el período comprendido entre el año 2010 y 2020. Una vez analizados los estudios primarios, se concluye que:

- Todos tienen un punto en común que es la optimización del esfuerzo y costos del proceso de despliegue.
- El 25% de los estudios primarios analizados proponen métricas que intervienen en el proceso de despliegue. Por otro lado, el 25% de las publicaciones proponen un framework para el proceso de despliegue. Mientras que el 38%, presenta un modelo para el proceso de despliegue de sistemas de software. Y el 12% restante, realiza la propuesta de un algoritmo para dicho proceso.
- El 50% de las publicaciones enfoca su propuesta a la optimización del esfuerzo del proceso de despliegue, el 25% se centran en una reducción de los costos y el 25% restante aborda su propuesta con el fin de incrementar la confiabilidad.
- El 42 % de las publicaciones realizan una validación de la propuesta de solución, el 29 % de los estudios presentan una evaluación de la propuesta de solución y el 29% corresponden a propuestas de solución. No se identificaron artículos que informen una experiencia u opinión.

Luego de analizar la literatura existente, como objetivo a largo plazo se propone definir un conjunto de métricas para el proceso de despliegue de sistemas de software para PyMES desarrolladoras de software de Argentina.

REFERENCIAS

- [1] A. López, A. Sánchez, G. Montejano, "Definición de Métricas de Calidad para Productos de Software", in *XVIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2016, Entre Ríos, Argentina)*. Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI), 2016.
- [2] D. Carrizo, A. Alfaro, "Método de aseguramiento de la calidad en una metodología de desarrollo de software: un enfoque práctico". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26 N° 1, 2018, pp. 114-129, 2018.
- [3] A. Chacón Luna, J. Rodas Silva, M. Vinueza Morales, "Estándares que contribuyen al desarrollo y entrega de productos de Software de Calidad". *Revista Ciencia UNEMI Vol. 8 - N° 13*, pp. 90 – 99, 2015.

- [4] N. U. Eisty, G. K. Thiruvathukal, and J. C. Carver, "A Survey of Software Metric Use in Research Software Development", in *2018 IEEE 14th International Conference on e-Science (e-Science)*. 2018.
- [5] A. Fuggetta and E. Di Nitto, "Software process", in *Proceedings of the on Future of Software Engineering* (pp. 1-12). 2014.
- [6] Reporte anual 2018 sobre el Sector de Software y Servicios Informáticos de la República Argentina. OPSSI. 2018.
- [7] S. Jansen, S. Brinkkemper, "Definition and validation of the key process of release, delivery and deployment for product software vendors: Turning the ugly duckling into a swan", in *IEEE International Conference on Software Maintenance*, ICSM, art. no. 4021334, pp. 166-175, 2006
- [8] J. B. Tyndall, "Building an effective software deployment process", in *Proceedings of the 40th annual ACM SIGUCCS conference on User services* (pp. 109-114), 2012.
- [9] N. Subramanian, "The software deployment process and automation". *CrossTalk*, 30(2), pp. 28-34, 2017.
- [10] J. P. Arcangeli, R. Boujbel, and S. Leriche, "Automatic deployment of distributed software systems: Definitions and state of the art", in *Journal of Systems and Software*, 103, 198-218, 2015.
- [11] K. S. Yim, "Norming to Performing: Failure Analysis and Deployment Automation of Big Data Software Developed by Highly Iterative Models", in *2014 IEEE 25th International Symposium on Software Reliability Engineering*. 2014.
- [12] D. Carrizo and L. Sanchez, "Benchmarking to adopt an asap-based methodological guideline for software systems deployment", in *30th IBIMA Conference*: 8-9 November 2017, Madrid, Spain, 2017.
- [13] K.M. Cyrus and A.V. Nejad, "The impact of national culture on the different phases of ERP implementation," in *Proceedings of 44th International Conference on Computers and Industrial Engineering and IMSS 2014 - 9th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems, Joint International Symposium on "The Social Impacts of Developments in Information, Manufacturing and Service Systems"*, pp. 1662-1671, 2014.
- [14] B. Kitchenham, D. Budgen, P. Brereton, *Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews*, Chapman and Hall 1 st. Editon. Chapman and Hall/CRC. USA, 2015.
- [15] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, M. Mattsson, "Systematic mapping studies in software engineering", in *Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, pp. 68-77, 2008.
- [16] R. Wieringa, N. Maiden, N. Mead, and C. Rolland, "Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion". *Requir. Eng.* 11(1), 102-107, 2005.
- [17] K. Petersen, S. Vakkalanka, L. Kuzniarz, "Guidelines for Conducting Systematic Mapping Studies in Software Engineering: An Update", in *Information and Software Technology*, 64, pp. 1-18, 2015.
- [18] C. Wohlin, "Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering", in *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, pp. 1-10, 2014.
- [19] C. Wohlin, P. Runeson, M. Hst, M.C. Ohlsson, B. Regnell, A. Wessln, "Experimentation in Software Engineering", *Springer Publishing Company*, 2012.
- [20] IEEE ISO/IEC/IEEE 12207:2017(E). *Systems and software engineering — Software life cycle processes* 2017.
- [21] I. Jacobson, G. Booch, J. Rumbaugh, *The Unified Software Development Process*. 1 st Edition. Addison Wesley, USA, 1999.
- [22] Agile Business Consortium. *The DSDM Agile Project Framework (2014 Onwards)*. Recuperado: <https://www.agilebusiness.org/resources/dsdm-handbooks>, last accessed 2019/05/29.

Estrategia didáctica instruccional OVA para la disminución del estrés en estudiantes universitarios bajo la pandemia Covid-19

Edgardo Muñoz Beltrán¹

Mery González Delgado²

Jhony Cruz Riveros³

María Inés Mantilla Pastrana⁴

Delvis Mejía Álvarez⁵

^{1,5}Universidad Popular del Cesar

^{2,3}Fundación Universitaria Área Andina

⁴Red latinoamericana de enfermería informática
Colombia

La pandemia del Covid-19 evidenció la importancia del desarrollo de nuevas estrategias educativas como una forma de lograr la interacción eficiente entre profesores y estudiantes. En este sentido, generar un contexto propicio para el logro circunscrito de la calidad educativa, la revolución tecnológica y su uso, combinando diferentes estrategias educativas, podría ser la dupla que amalgame el éxito en los procesos eficientes de la educación. Asimismo, la ansiedad es una variable visible en muchos contextos, en especial en las áreas educativas, sin embargo, cuando se torna permanente e interfiere en los resultados de las pruebas de los estudiantes es un problema, donde el desarrollo de objetos virtuales de aprendizaje combinados con el modelo instruccional puede fortalecer los resultados ante las pruebas y procesos educativos. Este estudio se desarrolló en grupos de estudiantes universitarios, donde se evaluó el nivel de la ansiedad mediante el inventario de estrés académico antes y después de las pruebas. En el *pretest* se evidenciaron altos niveles de estrés y, posterior al desarrollo de la instrucción y la construcción de un objeto virtual de aprendizaje, se aprecia la disminución de la ansiedad y el estrés académico. Esto, además de la evidencia de la literatura podrían ser un aporte como forma de vivenciar la educación en estos nuevos tiempos de una educación formal y clasicista, a una educación que englobe las nuevas tendencias informáticas, tecnológicas y, ante todo, una educación que aporta el conocimiento a la luz de la razón.

¹ Magíster en Salud Pública y Doctor en Educación.

Contacto: ejamub@yahoo.com.ar

² Magíster en Salud Pública.

Contacto: megonzalez2@areandina.edu.co

³ Magíster en Enfermería.

Contacto: jhcruz@areandina.edu.co

⁴ Doctora en Educación y Magíster en Enfermería.

Contacto: mariainesmantilla@gmail.com

⁵ Magíster en Educación en línea.

Contacto: delvismejia@unicesar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de métodos y estrategias para alcanzar adecuados resultados dentro del contexto académico universitario es necesario, en ese sentido los efectos de nuevas formas y maneras de evaluar, medir y conseguir objetivos académicos dentro de la comunidad universitaria se hace imprescindible. En la actualidad, se vive un contexto complejo desde la situación de pandemia porque el Covid-19 mantiene constantemente amenazada la vida propia y de las familias si no se toman las medidas adecuadas, en ese sentido todas las áreas de trabajo se encontrarán bajo el espectro de la enfermedad viral.

Es seguro que los estudiantes bajo esta nueva modalidad de estudios, como es la virtualidad en medio de la zozobra y riesgo de enfermar, puedan estar generando múltiples patrones de ansiedad, estrés y todo lo relacionado a la falta de equilibrio de la salud mental. Por lo tanto, es necesario visibilizar y entender los contextos que podrían afectar el normal transcurrir de los estudiantes universitarios dentro de una nueva forma de medición al cual ellos al inicio de sus carreras no estarían acostumbrados, en ese sentido son múltiples los estudios que así lo reflejan [1, 2] evidenciándose dentro del transcurrir de sus carreras eventos constantes de ansiedad y estrés que pudiesen incidir negativamente en el logro de los objetivos que pretenden [3] y a esto deberá sumarse lo íntimamente relacionado a las consecuencias directas de la actual pandemia por SARS COVID 2.

Dentro del contexto educativo general siempre ha existido la necesidad imperiosa de comprender y conocer los diferentes factores cognitivos y comportamentales que afectan al normal desarrollo, crecimiento y gestión dentro de los procesos educativos en los diferentes entornos de enseñanza.

Desde los años 60 se viene estudiando claramente los efectos que podrían ocasionar el estrés y la ansiedad en lo que respecta al rendimiento académico en los estudiantes [4] sin embargo, se siguen evidenciando efectos negativos que incurren en la oportunidad de alcanzar logros sistemáticos en los procesos de enseñanza. Los logros en la enseñanza estarían relacionados desde la perspectiva y contexto en que se desea indagar [5], en ese sentido es meritorio definir si usar el modelo tradicionalista constructivista, modelos predictivos educativos [6] o el modelo de rendimiento lógico [7].

El desarrollo de modelos diferentes a la enseñanza tradicional podrían ser factores y formas de lograr adecuados resultados, de esas formas podría ser el modelo instruccional que ha alcanzado ciertos logros en áreas de la informática y que podrían ser de ayuda en la enseñanza formal universitaria [8].

Con la pandemia actual los modelos de estudios y desarrollos bajo los entornos y apoyo de los sistemas de información podrían ser una forma certera de proyectar y generar confianza en los procesos educativos de los estudiantes, en ese sentido Vialart [9] manifiesta la importancia del desarrollo de nuevas estrategias de generación de conocimiento bajo la pandemia Covid-19. En este sentido, diferentes podrían ser las estrategias que disminuyan, orienten e identifiquen las diversas manifestaciones de estrés en los estudiantes universitarios. Un ejemplo de la manera en que se contextualizó la enseñanza bajo el entorno de la pandemia del SARS COVID 2 fue a través de la masificación del uso de las herramientas tecnológicas de comunicaciones por medio de los aparatos móviles en especial con el uso de los celulares, lo que se le denominó Mobile Learning.

Al respecto López [10] comenta que la utilización de teléfonos inteligentes de los propios estudiantes y profesores como herramientas para el aprendizaje implica estructurar nuevos modelos y metodologías de presentación de los contenidos de instrucción, lo cual propicia dinámicas de interacción y desarrollo de prácticas colaborativas. Así, el modelo instruccional o Assure se fundamenta en la corriente conductista [11] la cual influye sólidamente en los procesos exactos, metodológicos y acertados en la metodología de estudio, planeación y gestión en la educación [12].

Los resultados en los procesos educativos generalmente se vienen basando en la medición concertada bajo un número, sin tenerse en cuenta otros factores como contexto pre-exámenes, pre-evaluaciones, retroalimentación, uso y diseño de nuevas estrategias de medición y ante todo el conocimiento adquirido [13].

Otros factores, menos frecuentes son la evaluación de los niveles de ansiedad y estrés en la comunidad estudiantil, sin dudas esas variables podrían ser factores influyentes en la consecución de metas en el logro de los objetivos académicos en los estudiantes universitarios [14]. Por lo tanto, los modelos y métodos instruccionales toman preponderancia bajo la primicia del uso de las herramientas informáticas como una manera de apoyar la gestión del aprendizaje y como una forma de enfrentar la ansiedad y estrés en los estudiantes universitarios.

En este estudio se desarrolló como una forma de distinguir las situaciones por el cual estudiantes de una universidad desarrollaban ansiedad, estrés, generación de patrones de cambios en base a resultados en sus exámenes y en especial distinguir formas concretas entre las modalidades de enseñanza tradicional en contraste con la generación de una forma diferente de construir el conocimiento bajo la primicia de la instrucción.

Por lo tanto, se observó en un grupo de estudiantes de la especialidad de gerencia en salud de una universidad de la ciudad de Bogotá-Colombia, ansiedad y estrés ante las pruebas de exámenes y que repercutían negativamente en los resultados esperados. En ese sentido como objetivo planteado se determinó en el grupo de estudio los niveles de ansiedad como parte del proceso de enseñanza y aprendizaje en el logro de las metas académicas en el grupo señalado de estudio.

Mediante el desarrollo del modelo Assure y la promoción de la salud mediante el diseño de un objeto virtual de aprendizaje que les diera a los estudiantes conceptos claros, orientación y distinción en la identificación de factores de riesgos relacionados con la ansiedad y estrés se deseaba disminuir los índices de ansiedad y por consiguiente alcanzar una promoción en la enseñanza y resultados numéricos de las pruebas académicas. Corroborar mediante testeos de hipótesis si había diferencias significativas entre el desarrollo de formas de enseñanza tradicional comparado con una forma diferente de estrategia de enseñanza como una forma de lograr metas en los resultados de aprendizaje.

2. MÉTODO

La investigación es de carácter descriptivo, de prevalencia no aleatorizado en un grupo de 45 estudiantes de la especialidad de gerencia en salud, a los cuales se les aplicó el inventario de estrés académico IEA [15] antes de las pruebas escritas en tiempo real conexión sincrónica, evidenciado durante procesos de seguimiento de resultados no prometedores y adversos cuando los estudiantes tenían que enfrentar los exámenes y pruebas de conocimiento oral a través del chat vía plataforma sincrónica; de tal manera que, se deseaba observar si desarrollando nuevas estructuras de manejo y orientación académica podría incidir positivamente en el mejoramiento, estructuración y vivencia en la forma de adquirir los conocimientos, con mejores resultados.

La ansiedad estudiantil es un factor claro, observable y real que se evidencia en cualquier contexto educativo [16], por lo tanto, es acertado mencionar que es una característica que se observa en la educación primaria, secundaria y con mayor razón en la enseñanza universitaria, múltiples han sido las definiciones de las características de la ansiedad en el ámbito universitario [17-20], sin embargo, el desarrollo y descripción de nuevos modelos y estrategias de enseñanza para disminuir y controlar el estrés y ansiedad universitario está apenas iniciándose, en ese sentido es evidente que el trabajo en esa forma recién inicia.

Dentro de la hipótesis de estudio se considera que el uso de estrategias diferenciadas (Assure) es un factor clave e indispensable para el correcto aprendizaje y logro de los objetivos académicos en un contexto de estudio. El análisis del estudio se realizó mediante el software spss© 23.

Para la medición de la ansiedad en los estudiantes son numerosos los test y las formas de observarse y medirse, en ese sentido desde hace más de una década se han desarrollado diversas formas de verificar la ansiedad en los grupos de estudiantes en entornos universitarios, múltiples son los objetivos de cada test, algunos testean dimensiones relacionadas con el estrés universitario, otros test evalúan la ansiedad en comparación con las pruebas ante los exámenes, sin duda cada test tiene un objetivo establecido y la forma de utilizarlos debe ir complementado hacia el contexto y población objeto de estudio.

Al observar los diferentes tipos de instrumentos se decidió optar por el instrumento de autoevaluación de la ansiedad ante los exámenes (Inventario de estrés académico IEA), desarrollado en 1996. El IEA fue diseñado a partir de muestras recolectadas en estudiantes universitarios de la universidad autónoma de Madrid, que habían participado en un programa de entrenamiento en diferentes técnicas de estudio [21], este instrumento de tipo exploratorio, fue desarrollado para evaluar la ansiedad y estrés en los estudiantes universitarios.

Así, este permite definir las situaciones que generan mayor nivel de estrés y ansiedad percibida y su relación entre cada una de las manifestaciones o relaciones conductuales. Es un instrumento de tipo Likert con valores de 1 a 5 (donde 1 representa ausencia de estrés y 5 la presencia de mucho estrés), consta de tres dimensiones que evalúan las condiciones cognitivas, condiciones fisiológicas y condiciones motoras, en ese sentido resultados que vayan de 1 a 3 es una condición baja de ansiedad o estrés, por el contrario, puntuaciones de 3 a 4 manifiesta grado de ansiedad de tipo medio, y puntuaciones de 4 a 5 se consideran resultados de ansiedad alto.

Se procedió a realizar medición de la ansiedad antes de las pruebas escritas a los estudiantes de la especialidad, y posterior se realizaron los exámenes que hacían parte de sus currículos, de acuerdo con los resultados se estructuró el modelo Assure con sus respectivas variables. El modelo Assure [22] se sustenta en la teoría constructivista y hace hincapié en el papel activo del estudiante, propone actividades pedagógicas que permiten el aprendizaje en forma creativa y significativa [23].

Bajo la primicia que es importante el desarrollo y construcción de estrategias comparativas y que aumenten la posibilidad del uso de herramientas educativas que alimenten el constructo diferenciador de la enseñanza, como lo comenta el modelo SAMR. Según López [24] el modelo Sustitución, Aumentación, Modificación y Redefinición SAMR es un modelo que analiza la integración de los contenidos, la tecnología y la pedagogía.

El diseño instruccional (Tabla 1) tiene una gran oportunidad en los sistemas educativos, pues los roles que contiene son los desarrollados por docentes en su cotidianidad para la planeación y descripción de tareas y actividades, ya que proporciona las directrices o estructuras que ayudan a organizar las tareas/procedimientos para diseñar y realizar las actividades educativas. El modelo instruccional Assure proporciona herramientas claras, sencillas y operativas para ser usadas como actividades docentes y en especial practicadas por los estudiantes. Entre las evidencias utilizadas con el modelo se encuentran las características de la Tabla 2.

Tabla 1. Diseño de instrucción

Desarrollo de la instrucción	Meta del logro alcanzado
Tipo de instrucción: Evaluativa.	80%
No de ítems pre-evaluación: 20 ítems.	85%
Tipo de conocimiento: conceptual no numérico- numérico.	90%
Participación	100%
Tipo de preguntas: Abiertas de definiciones de conceptos- Link Kahoot participativas global- autogestión- retroalimentación-disruptivas- calificación final.	90%

Tabla 2. Establecimiento del Modelo Assure

A	S	S	U	R	E
Observación nivel de estudios.	Establecimiento de objetivos de aprendizaje,	Selección de estrategias,	Organizar el escenario de aprendizaje.	Participación de los estudiantes.	Evaluación y revisión de la implementación y resultados del aprendizaje. La evaluación del propio proceso llevará a la reflexión sobre el mismo y a la
Características sociales del grupo.	determinando los resultados que los estudiantes deben alcanzar al realizar el curso, indicando el grado en que serán conseguidos.	tecnologías, medios y materiales. Medios que serían más adecuados: texto, imágenes,	Revisión del curso antes de su implementación.	Fomentando a través de estrategias activas y cooperativas la participación del estudiante.	
Diseño de cuestionario de evaluación del perfil sociodemográfico.				Talleres, uso de Kahoot, evaluación	

Meta: alcanzar promedio superior en base a evaluación inicial sin la estrategia.	video, audio, y multimedia. Kahoot.	en clase como modo de preparación a pruebas calificables.	implementación de mejoras que redunden en una mayor calidad de la acción formativa.
--	-------------------------------------	---	---

Mediante el desarrollo de la estrategia instruccional se desarrolla el objeto virtual de aprendizaje OVA con la intención de identificar claramente factores de ansiedad y estrés, que pudieran interferir en los procesos normales de aprendizaje y abarcar sustancialmente dentro de esos procesos actividades correctivas para lograr resultados acordes con el manejo de la ansiedad y estrés, y visibilizar los resultados en la forma adecuada del conocimiento:

Tipo de diseño: Objeto Virtual de Aprendizaje

Nombre del objeto virtual de aprendizaje: *Identificando la ansiedad estudiantil*

Objetivo: Identificar la ansiedad en los estudiantes y abordar las formas de cómo generar patrones de conducta en su resolución.

Plataforma de construcción: Exelearning

Página Web: <https://cutt.ly/Qv9VBBR>

Validación: de contenido y de constructo

3. RESULTADOS

De acuerdo a los resultados demográficos observados en el presente estudio se evidenció que el 31.1% correspondían al género masculino y un 68.9% representaban al género femenino. El 100% de la muestra total correspondían a profesionales de la salud con estudios de pregrado, quienes se encontraban realizando estudios de especialización. En relación con los profesionales que hacían parte de la muestra objeto de estudio, correspondían a 16 médicos (35.6%), 14 profesionales de enfermería (31.1%), 6 odontólogos (13.3%), 4 nutricionistas (8.9%) y 5 fisioterapeutas (11.1%).

Al evaluar los resultados de la medición del Inventario Estrés Académico antes de hacer las evaluaciones escritas-orales y con el examen posterior al test se evidenciaron los siguientes resultados (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados Inventario estrés Académico y pruebas Pretest.

Resultados IEA			Pre-test		
Manifestación Cognitiva	Manifestación Fisiológica	Manifestación Motora	N	Media	Desviación estándar
3.61	3.76	3.48	45	3.2	0.312

Dentro de los resultados en las pruebas pre-examen se evidenciaron altos niveles de ansiedad, manifestación cognitiva 3.61, manifestación motora 3.48 y manifestación fisiológica 3.76, esto se relacionó con puntajes bajos en las pruebas de exámenes con un promedio de nota de 3.2 (calificación de 1 a 5).

Sin embargo, con el desarrollo de la metodología Assure, desarrollándose en la muestra objeto de estudio las características de dicho modelo se lograron mejores resultados en la disminución del estrés pre-examen con mejoras en los resultados de ansiedad, en ese sentido valores de manifestación cognitiva de 2.7, motora de 2.8 y manifestación fisiológica de 2.9.

En cuanto al análisis de la hipótesis mediante la prueba de los rangos con signo de wilcoxon, se evidenció una probabilidad menor a 0.05 rechazándose la hipótesis nula, en ese sentido se corroboró que existían diferencias entre el uso y evaluación con metodología tradicional y el desarrollo de la metodología Assure. (Tabla 3):

- resultados con la estrategia < resultados pre test
- resultados con la estrategia > resultados pre test
- resultados con la estrategia = resultados pre test
- se basa en rangos negativos

Tabla 3. Prueba de Hipótesis: Rangos con signo de Wilcoxon

Rangos				
		N	Rango promedio	Suma de rangos
resultados con la estrategia resultados pre-test	Rangos negativos	0 ^a	,00	,00
	Rangos positivos	45 ^b	28,50	1596,00
	Empates	0 ^c		
	Total	45		
Estadísticos de prueba				
		Resultados con la estrategia - resultados pre-test		
	Z			-6,658 ^d
	Sig. asintótica (bilateral)			,000

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de estrategias de enseñanza innovadoras dentro de contextos educativos es fundamental para el logro de objetivos dentro de cada proceso académico, se evidencio fuerte relación entre el modo, la forma y el constructo evaluado interrelacionando la ansiedad-estrés con los resultados vivenciados, en ese sentido es claro entender la importancia de la estrategia utilizada como una manera de alcanzar resultados óptimos, manejo de la ansiedad y el adecuado conocimiento de lo que se pretende enseñar.

Los modelos de enseñanza innovadoras como una forma de alcanzar mejores resultados en el mismo proceso de aprendizaje, diversos autores [25-27] consideran que el cambio en la forma, contexto y estructura de la educación tradicional basadas en la ciencia positivista tenía que ser dirigida no solo a la forma de desarrollarla, sino más bien se debía hacer un cambio integral desde los conceptos mismos de la manera de educar hacia un desarrollo más humano, integrador y tendiendo presente las nuevas herramientas digitales que se tendrían a disposición.

El estrés y ansiedad se hizo presente en el grupo objeto de estudio, al hacer la medición sin ninguna intervención especial se corroboró que se alcanzaron malos resultados en la forma de efectivizar, adquirir e impactar en el aprendizaje y en definitiva en la manera numérica de evaluar esos resultados.

Es también conocido que se podría debatir en la forma de evaluar un examen, en ese sentido para pasar de un nivel de estudio a otro, se necesita un dato numérico como una manera simple, rápida y concreta de promover el paso de un nivel jerárquico a otro, sin embargo este concepto viene evaluándose cada día y en la actualidad existen muchos detractores y a favor en donde no se ha podido llegar a un consenso donde realmente se pueda definir que la promoción de los estudiantes debería ser definida no por un número establecido sino por logros basados en las competencias y habilidades que le exigirá la carrera que se curse y la forma de impactar en una sociedad [28].

Claramente se corroboró la hipótesis del estudio, cuando se observó a la luz de los resultados y al hacer la comparación de malos resultados y altos niveles de estrés estudiantil con la técnica de aprendizaje tradicional, y al incorporar nuevas facetas y modelos de estudios diferenciados con la metodología Assure, evidentemente el cambio se notó en los resultados finales de las pruebas con la aplicación de nuevas formas de enseñanza instruccional.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de OVAs enfocados en estrategias de instrucción podrían ser de mucha ayuda durante los procesos de enseñanza, porque evidencia una clara visión de las estructuras anímicas, sociales y comportamentales de los estudiantes ante situaciones de estrés, conformaría y daría herramientas a los docentes para la toma de decisiones acertadas en la forma de enseñar, en la manera de llegar y de relacionar el conocimiento que se desea brindar a los estudiantes y, ante todo, agiliza la visión y el contexto en el que se encuentran los estudiantes dentro de las manera y el desarrollo de las técnicas de aprendizaje.

Con el desarrollo y puesta en acción de formas diferentes de enseñanza y aprendizaje en entornos universitarios y la manera de relacionar esos resultados comparándolos con la manera de aprendizaje

tradicional con una nueva estrategia y modelo de enseñanza, como es el modelo instruccional o Assure, podría ser la manera correcta y direccional de alcanzar un cambio en la forma de desarrollar formas de enseñanza, disminuir la ansiedad y estrés entre los estudiantes, en ese contexto se evidenció claros resultados en los logros académicos en los estudiantes objetos del estudio y de esa forma alcanzar mejores resultados en la comunidad estudiantil como una clara metodología en la evolución, procesamiento y logros de los objetivos académicos de los estudiantes dentro de su entorno educativo.

Es necesario que en los entornos educativos universitarios se desarrollen estrategias de aprendizaje correctas que vayan en concordancia con los cambios en los modelos educativos y con los cambios vivenciales acordes con las nuevas tecnologías de aprendizaje como una manera integradora entre las estrategias de aprendizaje, el contexto educativo y las estructuras psicológicas de los estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] J. Álvarez, J. Aguilar y S. Segura, "El estrés ante los exámenes en los estudiantes universitarios: Propuesta de intervención," *Int. J. Dev. Educ. Psychol.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–63, 2011.
- [2] L. M. Casari, J. Anglada y C. Daher, "Estrategias de afrontamiento y ansiedad ante exámenes en estudiantes universitarios," *Rev. Psicol.*, vol. 32, no. 2, pp. 243–269, 2014.
- [3] I. Didacticas, "Estudiantes Universitarios," *Apunt. Psicol. Univ. Sevilla*, vol. 25, no. Inhelder 1974, pp. 87–100, 1982.
- [4] F. Contreras, J. C. Espinosa, G. Esguerra, A. Haikal, A. Polanía y A. Rodríguez, "Autoeficacia, ansiedad y rendimiento académico en adolescentes," *Diversitas*, vol. 1, no. 2, p. 183, 2005.
- [5] B. Comercial y D. E. P. Pesqueros, "Rendimiento academico," *Rev. argentina Educ. Super.*, no. 1852, pp. 9–38, 2014.
- [6] J. A. Valle, "revista internacional de investigación e innovación educativa," *Rev. Int. Investig. e innovación Educ.*, vol. 1, no. 2386-4303, pp. 220–236, 2018.
- [7] J. C. Michalus, "Análisis del rendimiento academico mediante un modelo logit," *Ing. Ind.*, vol. 9, no. 2, pp. 47–56, 2010.
- [8] M. Y. Jiménez, "Enseñanza e Investigación en Psicología Consejo Nacional para la Enseñanza e Investigación en Psicología Universidad Veracruzana Xalapa, México," *Enseñanza e Investig. en Psicol.*, vol. 1, pp. 293–302, 2004.
- [9] M. N. Vialart, "Estrategias didácticas para la virtualización del proceso enseñanza aprendizaje en tiempos de COVID-19," *Educ. Médica Super.*, vol. 34, no. 3, 2020.
- [10] C. Laucirica, "Revista Habanera De Ciencias Medicas," *Rev. Haba. Ciencias Medicas*, vol. 6, no. 5, pp. 1–15, 2007.
- [11] G. Ben, L. P. Investigador, S. L. Potos, P. Ca, L. No y S. L. Potos, "El Modelo De Diseño Instruccional Assure Aplicado a La," *Rev. Acad. Investig.*, vol. 2, 2010.
- [12] R. T. Sataloff, M. M. Johns y K. M. Kost, *Los Modelos Tecno-Educativos, revolucionando el aprendizaje del siglo XXI*, 1st ed. Mexico, 2014.
- [13] J. Valenzuela, M. Ramirez y J. Alfaro, "Construcción de indicadores institucionales para la mejora de la gestión y la calidad educativa," *Rev. Iberoam. evaluación Educ.*, vol. 2, pp. 60–81, 2009.
- [14] R. G. Cabanach, F. Fariña, C. Freire, P. González y M. del M. Ferradás, "Diferencias en el afrontamiento del estrés en estudiantes universitarios hombres y mujeres," *Eur. J. Educ. Psychol.*, vol. 6, no. 1, p. 19, 2015.
- [15] M.I Monzon, "Estudiantes Universitarios," *Apunt. Psicol. Univ. Sevilla*, vol. 1, no. 0213–3334, pp. 87–100, 2007.
- [16] D. Pitoni y A. Rovella, "ANSIEDAD Y PERFECCIONISMO: SU RELACIÓN CON LA EVALUACIÓN ACADÉMICA UNIVERSITARIA Test anxiety and perfectionism: Its relation to university academic assessment," *Enseñanza e Investig. en Psicol.*, vol. 18, no. 2, pp. 329–341, 2013.
- [17] L. Furlan, E. Pérez y M. Moyano, "Propiedades psicométricas y estandarización de la Escala de Ansiedad Cognitiva frente a los Exámenes a la población universitaria argentina.," *Rev. Evaluar*, vol. 10, no. 1, pp. 22–31, 2010.
- [18] M. Martínez y Pulido B., "Niveles de estrés y rendimiento académico en estudiantes de la carrera de Psicología del Centro Universitario de Los Altos," *Rev. Educ. Y Desarro.*, vol. 1, pp. 77–82, 200.
- [19] M. Martin, "Estudiantes Universitarios," *Apunt. Psicol. Univ. Sevilla*, vol. 25, no. Inhelder 1974, pp. 87–100, 2007.
- [20] M. Antonio et al., "Estrés académico en estudiantes universitarios 1," *Psicol. y salud*, vol. 21, no. 55, pp. 31–37, 2011.
- [21] C. Román, F. Ortiz y Y. Hernández, "El estrés académico en estudiantes latinoamericanos de la carrera de Medicina," *Rev. Iberoam. Educ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1–8, 2008.
- [22] M. G. Benítez, "El Modelo De Diseño Instruccional Assure Aplicado a La," *Rev. Acad. Investig.*, vol. 1, no. April, 2010.
- [23] J. I. Priego, J. O. Melis, S. Llana-Belloch, P. Pérezsoriano, J. C. G. García y M. S. Almenara, "Padel: A Quantitative study of the shots and movements in the high-performance," *J. Hum. Sport Exerc.*, vol. 8, no. 4, pp. 925–931, 2013.
- [24] C. López y F. D'Silva, "Enseñar en pandemia: Diseño Instruccional (DI) como herramienta fundamental para atreverse en la educación digital Teach in pandemic : Instructional Design (DI) as a fundamental tool to dare in digital education Ensino em uma pandemia : Design Instru," *Rediunp*, vol. 2, no. 1, pp. 3–21, 2020.

- [25] M. I. Torres, "La enseñanza tradicional de las ciencias versus las nuevas tendencias educativas," *Rev. Electrónica Educ.*, vol. 14, no. 1, pp. 131–142, 2010.
- [26] E. García y J. Carlos, "Education in the Knowledge Society," *Educ. Knowl. Soc.*, vol. 18, pp. 147–162, 2017.
- [27] K. F. Cáceres, "Educación virtual: Creando espacios afectivos, de convivencia y aprendizaje en tiempos de COVID-19," *CienciAmérica*, vol. 9, no. 2, p. 38, 2020.
- [28] M. Mollo y P. Medina, "Evaluación formativa propuesta pedagógica integral en tiempos de pandemia," *Maest. y Soc. Rev. electrónica para Maest. y Profesores*, vol. 17, no. 4, pp. 635–651, 2020.

Análisis de la sinergia entre la analítica del aprendizaje y el diseño del aprendizaje: Un estudio de mapeo sistemático

Iris Inés Sattolo¹

Marisa Daniela Panizzi²

Vanesa Contreras³

María Alejandra Valensise⁴

Universidad de Morón

Argentina

Con el fin de evaluar el aprendizaje a través de los datos ofrecidos por los entornos, en los cursos en línea provistos por las instituciones de educación superior se aplican herramientas provenientes de la Inteligencia Artificial, tales como la Analítica del Aprendizaje. En la actualidad se observa que los Diseños de Aprendizaje deben ser considerados en el desarrollo de esta nueva perspectiva. En este capítulo se presenta los resultados de un Estudio de Mapeo Sistemático, realizado con el propósito de analizar el estado del arte sobre Analítica del Aprendizaje y Diseños de Aprendizaje, y se evalúa los aspectos que se tienen en cuenta para su interrelación.

¹ Licenciada en Sistemas y candidata a Magíster en Lenguajes y Sistemas Informáticos. Profesora Adjunta e Investigadora.

Contacto: iris.sattolo@gmail.com

² Licenciada en Sistemas, Magíster en Informática y candidata a doctora en Ciencias Informáticas. Profesora e investigadora. Categoría IV en el Programa de Incentivos del Ministerio de Educación.

Contacto: marisapanizzi@outlook.com

³ Estudiante de la Licenciatura en Sistemas.

Contacto: vane_contreras@yahoo.com.ar

⁴ Estudiante de la Licenciatura en Sistemas.

Contacto: avalesise@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia que estamos transitando desde el 2020, causada por el virus SAR-COV-2, ha demostrado que, de no haber existido el dictado de cursos a distancia, la educación en todos sus niveles se hubiera visto afectada.

El desarrollo de las TIC impulsó una evolución de los medios de enseñanza originando nuevas formas de interacción entre sus participantes. Si la institución en la que se dictan los cursos ofrece algún entorno virtual de aprendizaje, denominados Learning Management Systems LMS, se pueden obtener datos suministrados por la interacción de los estudiantes con el entorno y la interacción del estudiante con el profesor. Este suceso aporta nuevas posibilidades en la enseñanza, el aprendizaje, la investigación y la expresión creativa.

En consecuencia, extraer información útil de los datos educativos recopilados motivó, en la última década, el surgimiento de nuevas disciplinas e investigación, con un alto potencial para impactar en los modelos de educación existente. Una de estas disciplinas, mencionada en [1], es la Analítica del Aprendizaje, o Learning Analytics LA, impulsada por [2], quien organiza la Conferencia Internacional sobre Learning Analytics & Knowledge LAK y el Learning Analytics Summer Institute LASI.

El concepto de LA está definido como *la medición, recopilación, análisis e informe de datos sobre los estudiantes y sus contextos, con el fin de comprender y optimizar el aprendizaje y los entornos en que ocurre* [3]. El LA, para que funcione de manera efectiva como herramienta de retroalimentación, debe integrarse con enfoques pedagógicos y con el Diseño del Aprendizaje [4]. Este último, puede entenderse como: *una secuencia de actividades que deben llevarse a cabo en cualquier proceso de aprendizaje define tareas, proporcionan los contextos y recursos para realizar dichas tareas, apoyan al estudiante durante el desempeño de la tarea y proporcionan retroalimentación sobre los resultados* [5].

En [6] se señala que *en la integración de estos dos conceptos - LA y LD- los diseños de aprendizaje documentan la intención y los planes pedagógicos, potencialmente proporcionan el contexto para dar sentido a los datos analíticos de aprendizaje. Esencialmente, el diseño del aprendizaje establece los objetivos y los planes pedagógicos, que luego se pueden evaluar con los resultados capturados a través de la analítica del aprendizaje.*

En el contexto del proyecto de investigación denominado *Aplicación de Analítica del Aprendizaje sobre un curso a distancia desarrollado con técnicas de Diseño del Aprendizaje*, código 80020190300011 UM de la Secretaría de Ciencia y Tecnologías de la Universidad de Morón, se decidió analizar la literatura existente sobre LA y LD y su potencial sinergia, realizando un Estudio de Mapeo Sistemático SMS de acuerdo con el proceso propuesto en [7].

2. MÉTODO

En esta sección, se exhibe la definición del protocolo de revisión del Estudio de Mapeo Sistemático: las preguntas de investigación, la estrategia de búsqueda, los criterios de selección de los estudios, el esquema de clasificación y el diseño del formulario de extracción de datos.

El objetivo de este Estudio de Mapeo Sistemático consiste en responder la siguiente pregunta de investigación PI: *¿Cuál es el estado del arte sobre el trabajo realizado en instituciones de nivel superior en la Analítica del aprendizaje y los Diseños de Aprendizaje aplicados al trabajo en línea?* Esta pregunta se descompone en las sub-preguntas que se presentan en la Tabla 1, juntamente con su motivación.

Como estrategia de búsqueda, para encontrar artículos que se refieran a los temas de las preguntas de investigación, se definieron las siguientes fuentes de búsqueda: IEEE Xplorer, Scopus, Biblioteca Digital de ACM, Google Academic y ProQuest. Se realizó una selección automática de artículos en el período comprendido entre el año 2010 hasta marzo del 2020.

Tabla 1. Preguntas de investigación PI y motivación MO

Sub-pregunta	Motivación
PI 1 ¿Qué propuestas existen de LA en los cursos de e-learning en educación superior?	MO 1 Descubrir las propuestas en LA en la educación superior y conocer los avances del LA en la actualidad.
PI 2 ¿Qué aspectos se tienen en cuenta en el LD en e-learning?	MO 2 Determinar los elementos utilizados en el diseño de aprendizaje para cursos de e-learning en educación superior.
PI 3 ¿Existe sinergia entre el LA y el LD?	MO 3 Identificar los aportes existentes en la interacción LA y LD.
PI 4 ¿Qué tipo de investigación se usó en el artículo leído?	MO 4 Clasificar los estudios primarios de acuerdo con la clasificación propuesta en [8].

La cadena de búsqueda utilizada se adaptó a cada uno de las librerías, repositorios y plataformas digitales debido a las limitaciones encontradas donde la inserción de cadenas complejas no estaba permitida. La Cadena de búsqueda utilizada ha sido: *Learning Analytics* OR *Analítica del aprendizaje* AND *Learning Design* OR *Diseños de aprendizaje* AND *Higher education* OR *Educación Superior*. Los criterios de inclusión y exclusión utilizados para el proceso de selección se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de Inclusión
I1. Artículos que respondan las preguntas de investigación.
I2. Artículos duplicados. De los artículos escritos por el mismo autor sobre un mismo tópico o similar, se considera el más completo.
I3. Artículos publicados desde el año 2010 hasta el año 2020 (marzo).
I4. Artículos escritos en el idioma inglés y español.
I5. Artículos que solo se refieren a la educación superior.
Criterios de Exclusión
E1. Artículos que se presenten como revisiones sistemáticas.
E2. Artículos disponibles solo en formato de resumen, presentaciones en power point, tesis doctorales, libros.
E3 Artículos sin revisión por pares.
E4. Artículos que se relacionan con MOOCs.

El formulario diseñado para la extracción de datos se compone de dos partes. La primera parte consiste en los metadatos de cada uno de los estudios primarios, y la segunda consta de cada una de las dimensiones que responden a las preguntas de investigación. El formulario se presenta en la Tabla 3. Con el propósito de responder cada una de las preguntas de investigación se definió un esquema de clasificación. Algunas de las categorías del esquema de clasificación se han definido en la actividad de planificación del Estudio de Mapeo Sistemático, mientras que otras fueron extraídas durante la lectura de los artículos. La categoría *no contribuye*, se tuvo en cuenta para catalogar aquellos trabajos que no aplicaban a ninguna de las características de la dimensión propuesta, pero si lo hacían en otras dimensiones.

Tabla 3. Formulario de extracción de datos.

Metadatos	ID, año, título, autor/es, tipo de publicación (revista o congreso), Fuente de búsqueda, país, palabras clave.
PI/Dimensión	Categorías
PI1/Learning Analytics	Algoritmos Machine Learning, datos (tipos-procesos de datos) técnicas de detección, herramientas de visualización, modelo/ framework, líneas de acción, no contribuye.
PI2/ Learning Designs	Metodología, proceso, marco de trabajo, modelo, tareas/actividades, herramientas, evaluación de LD, perspectivas pedagógicas teóricas, calidad, taxonomía (clasificación), no contribuye.
PI3/Sinergia entre LA y LD	Modelo, marco de trabajo, metodología, herramientas, intervención en tiempo de ejecución, no contribuye.
PI4/Tipos de investigación	Evaluación, propuesta de solución, comunicar experiencia, validación, opinión.

3. RESULTADOS

El proceso seguido para encontrar los artículos que fueron analizados, en adelante estudios primarios, consistió en aplicar la cadena de búsqueda sobre las fuentes seleccionadas. Se encontraron 166 artículos, cuya distribución se muestra en la Tabla 4.

El listado de los 57 estudios primarios analizados se presenta en la Tabla 5. Cada estudio primario analizado se nombra como [EPn°]

Tabla 4. Artículos encontrados, desestimados y primarios

Fuente de búsqueda	Encontrados	Desestimados	Estudios Primarios
Google academic	36	13	23
ACM	24	16	8
IEEE Xplorer	35	27	8
SCOPUS	31	20	11
ProQuest	39	31	8

Tabla 5. Estudios primarios analizados

[EP1] Lockyer Lori, Elizabeth Heathcote, Shane Dawson, Informing Pedagogical Action: Aligning Learning Analytics with Learning Design American Behavioral Scientist © 2013 SAGE Publications Reprints and permissions: sagepub.com/journalsPermissions.nav. (2013)
[EP2] Ferguson, R., Brasher, A., Clow, D., Cooper, A., Hillaire, G., Mittelmeier, J., Rienties, B., Ullmann, T., Vuorikari, R. Research Evidence on the Use of Learning Analytics - Implications for Education Policy. R. Vuorikari, J. Castaño Muñoz (Eds.). Joint Research Centre Science for Policy Report; EUR 28294 EN. (2016).
[EP3] Marcel Schmitz, Evelien van Limbeek, Wolfgang Greller, Peter Sloep, Hendrik Drachsler . Opportunities and Challenges in Using Learning Analytics in Learning Design © Springer International Publishing AG 2017 É. Lavoué et al. (Eds.): EC-TEL 2017, LNCS 10474, pp. 209–223, (2017).
[EP4] Hilliger, Isabel & Aguirre, Camila & Miranda, Constanza & Celis, Sergio & Pérez-Sanagustín, Mar. Design of a curriculum analytics tool to support continuous improvement processes in higher education. 181-186. 10.1145/3375462.3375489. (2020).
[EP5] Lockyer Lori and Shane Dawson Learning Designs and Learning Analytics LAK'11, February 27-March 1, 2011, Banff, Canada.
[EP6] Holmes W., Culver J. Automating the Categorization of Learning Activities, to Help Improve Learning Design. In: Isotani S., Millán E., Ogan A., Hastings P., McLaren B., Luckin R. (eds) Artificial Intelligence in Education. AIED 2019 Lecture Notes in Computer Science, vol 11626. Pp 105-109 Springer, Cham. (2019)
[EP7] Ed de Quincey, Chris Briggs, Theocharis Kyriacou, and Richard Waller. Student Centred Design of a Learning Analytics System. In The 9th International Learning Analytics & Knowledge Conference (LAK19), March 4–8, (2019) Tempe, AZ, USA. ACM, New York, NY, USA, 10 pages.
[EP8] Sciarrone, Filippo & Temperini, Marco. Learning Analytics Models: A Brief Review. 287-291. 10.1109/IV.2019.00055. (2019).
[EP9] Antonette Shibani, Simon Knight, and Simon Buckingham Shum. Contextualizable Learning Analytics Design: A Generic Model and Writing Analytics Evaluations. In Proceedings of the International Conference on Learning Analytics and Knowledge (LAK19), March 2019, Tempe, AZ, USA. ACM, New York, NY, USA, 10 pages.
[EP10] Corrin, L., Kennedy, G., Barba, P.D., Bakharia, A., Lockyer, L., Gasevic, D., Williams, D., Dawson, S., & Copeland, S. (2015). Loop: A learning analytics tool to provide teachers with useful data visualisations. In T. Reiners, B.R. von Konsky, D. Gibson, V. Chang, L. Irving, & K. Clarke (Eds.), Globally connected, digitally enabled. Proceedings ascilite 2015 in Perth (pp. CP:57-CP:61).
[EP11] Seufert, Sabine & Guggemos, Josef & Sonderegger, Stefan. Learning Analytics in Higher Education using Peer-feedback and Self-assessment: Use Case of an Academic Writing Course. 315-322. 10.5220/0007714603150322. (2019).
[EP12] Albó L., Barria-Pineda J., Brusilovsky P., Hernández-Leo D. Concept-Level Design Analytics for Blended Courses. In: Scheffel M., Broisin J., Pammer-Schindler V., Ioannou A., Schneider J. (eds) Transforming Learning with Meaningful Technologies. EC-TEL 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11722. Springer, Cham (2019)
[EP13] Mittelmeier, Jenna; Long, Dianne; Cin, Firdevs Melis; Reedy, Katharine; Gunter, Ashley; and Rienties, Bart Learning design in diverse institutional and cultural contexts: suggestions from a participatory workshop with higher education professionals in Africa. Open Learning: The Journal of Open, Distance and e-learning, 33(3) pp. 250–266. (2018).
[EP14] Nguyen, Quan; Rienties, Bart and Toetenel, Lisette. Mixing and Matching Learning Design and Learning Analytics. In: Learning and Collaboration Technologies: Technology in Education - 4th International Conference, LCT 2017 Held as Part of HCI International 2017 Vancouver, BC, Canada, July 9–14, 2017 Proceedings, Part II (Zaphiris, Panayiotis and Ioannou, Andri eds.), Springer, pp. 302–316 (2017)
[EP15] Toetenel, Lisette and Rienties, Bart. Learning Design – creative design to visualise learning activities. Open Learning: The Journal of Open, Distance and e-learning, 31(3) pp. 233–244. (2016)
[EP16] Ifenthaler, D., Gibson, D., & Dobozy, E. Informing learning design through analytics: Applying network graph analysis. Australasian Journal of Educational Technology, 34(2), 117-132. (2018).
[EP17] Gašević, D., Dawson, S. & Siemens, G. Let's not forget: Learning analytics are about learning. TECHTRENDS TECH TRENDS 59, 64–71 (2015)
[EP18] Corrin, L., Kennedy, G. & Mulder, R. Enhancing learning analytics by understanding the needs of teachers. In H. Carter, M. Gosper and J. Hedberg (Eds.), Electric Dreams. Proceedings ascilite (2013)
[EP19] Bart Rienties, Lisette Toetenel, Annie Bryan "Scaling up" learning design: impact of learning design activities on LMS behavior and performance LAK '15, March 16 - 20, 2015, Poughkeepsie, NY, USA Copyright 2015 ACM 978-1-4503-3417-4/15/03
[EP20] M. Ortiz-Rojas, R. Maya, A. Jimenez, I. Hilliger and K. Chiluiza, "A Step-by-Step Methodology for Software Design of a Learning Analytics Tool in Latin America: A Case Study in Ecuador,"2019 XIV Latin American Conference on Learning Technologies (LACLO), San Jose Del Cabo, Mexico, 2019, pp. 116-122.
[EP21] E. Okewu and O. Daramola, "Design of a learning analytics system for academic advising in Nigerian universities," 2017 International Conference on Computing Networking and Informatics (ICCNi), Lagos, 2017, pp. 1-8.
[EP22] Dai Griffiths, The Use of Models in Learning Design and Learning Analytics, Interaction Design and Architecture(s) Journal - IxD&A, N.33, 2017, pp. 113-133.
[EP23] Liaqat Ali, Marek Hatala, Dragan Gašević, Jelena Jovanović, A qualitative evaluation of evolution of a learning analytics tool, Computers & Education, Volume 58, Issue 1, 2012, Pages 470-489, ISSN 0360-1315. (2012)

- [EP24]** Bakharia, Aneesa & Corrin, Linda & de Barba, Paula & Kennedy, Gregor & Mulder, Raoul & Williams, David & Dawson, Shane & Lockyer, L. & Gasevic, Dragan. A Conceptual Framework linking Learning Design with Learning Analytics. 10.1145/2883851.2883944. (2016)
- [EP25]** Laurillard D., P. Charlton, B. Craft, D. Dimakopoulos, D. Ljubojevic, G. Magoulas, E. Masterman, R. Pujadas, E.A. Whitley & K. Whittlestone, A constructionist learning environment for teachers to model learning designs, *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol. 29 issue 1. (2011)
- [EP26]** Matcha, Wannisa & Gasevic, Dragan & Ahmad Uzir, Nora'Ayu & Jovanovic, Jelena & Pardo, Abelardo. *Analytics of Learning Strategies: Associations with Academic Performance and Feedback*. 461-470. 10.1145/3303772.3303787. (2019)
- [EP27]** M. Fernández-Delgado, M. Mucientes, B. Vázquez-Barreiros and M. Lama, "Learning analytics for the prediction of the educational objectives achievement," 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings, Madrid, 2014, pp. 1-4.
- [EP28]** Ifenthaler, D., Gibson, D. & Dobozy, E. The synergistic and dynamic relationship between learning design and learning analytics. In H. Partridge, K. Davis, & J. Thomas. (Eds.), *Me, Us, iT! Proceedings ASCILITE2017: 34th International Conference on Innovation, Practice and Research in the Use of Educational Technologies in Tertiary Education* (pp. 112-116). (2017).
- [EP29]** Begoña Gros. *The design of smart educational Environments Gros Smart Learning Environments* (2016) 3:15.
- [EP30]** Vlatko Lukarov, Mohamed Amine Chatti, Ulrik Schroeder *Learning Analytics Evaluation –Beyond Usability Proceedings of DeLFI Workshops 2015 co-located with 13th e-Learning Conference of the German Computer Society (DeLFI 2015) München, Germany, September 1, 2015* 123.
- [EP31]** Schneider, Daniel, et al. Requirements for learning scenario and learning process analytics. In: T. Amiel & B. Wilson. *World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications*. Chesapeake, VA: AACE, 2012. p. 1632-1641.
- [EP32]** Atkinson, Simon. *Using Learning Design to Unleash the Power of Learning Analytics*. (2015).
- [EP33]** V. Franzoni, P. Mengoni and A. Milani, "Dimensional Morphing Interface for Dynamic Learning Evaluation," 22nd International Conference Information Visualisation (IV), Fisciano, 2018, pp. 332-337.
- [EP34]** Rodríguez-Triana, María & Martínez-Monés, Alejandra & Asensio-Pérez, Juan & Dimitriadis, Yannis. *Script-Aware Monitoring Model: Using Teachers' Pedagogical Intentions to Guide Learning Analytics*. *CEUR Workshop Proceedings*. 894. (2012)
- [EP35]** Jan, S. & Vlachopoulos, P. Influence of Learning Design of the Formation of Online Communities of Learning. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*. (2018)
- [EP36]** Cohen, JA Evidence based learning design – the opportunities afforded by learning analytics "Developent and learning in organizations, vol. 32 No. 4, págs. 10-13. (2018),
- [EP37]** Quan Nguyen, Michal Huptych, Bart Rienties *Linking Students' Timing of Engagement to Learning Design and Academic Performance LAK '18, March 7–9, 2018, Sydney, NSW, Australia ssoiation for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-6400-3/18/03*. (2018)
- [EP38]** Schmitz M., Scheffel M., van Limbeek E., Bemelmans R., Drachsler H. "Make It Personal!" - Gathering Input from Stakeholders for a Learning Analytics-Supported Learning Design Tool. En: Pammer-Schindler V., Pérez-Sanagustín M., Drachsler H., Elferink R., Scheffel M. (eds) *Lifelong Technology-Enhanced Learning. EC-TEL 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11082. Springer, Cham.
- [EP39]** Abelardo Pardo, Feifei Han, and Robert A. Ellis, *Combining University Student Self-Regulated Learning Indicators and Engagement with Online Learning Events to Predict Academic Performance* *IEEE TRANSACTIONS ON LEARNING TECHNOLOGIES*, VOL. 10, NO. 1, JANUARY-MARCH 2017.
- [EP40]** Rienties, B., Herodotou, C., Olney, T., Schencks, M. & Boroowa, A. Making Sense of Learning Analytics Dashboards: A Technology Acceptance Perspective of 95 Teachers. *Inter- Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19 (5). (2018).
- [EP41]** Greller, W., & Drachsler, H. Translating Learning into Numbers: A Generic Framework for Learning Analytics. *Educational Technology & Society*, 15 (3), 42–57. (2012)
- [EP42]** Chatti, Mohamed & Dyckhoff, Anna & Schroeder, Ulrik & Thüs, Hendrik. A Reference Model for Learning Analytics. *International Journal of Technology Enhanced Learning*. 4. 318-331. 10.1504/IJTEL.2012.051815. (2012)
- [EP43]** Kennedy, Gregor & Corrin, Linda & Lockyer, L. & Dawson, Shane & Williams, David & Mulder, Raoul & Khamis, Susie & Copeland, Scott. *Completing the loop: returning learning analytics to teachers*. (2014)
- [EP44]** Ifenthaler, D. Are Higher Education Institutions Prepared for Learning Analytics? *TechTrends* 61,366–371 (2017).
- [EP45]** Karthik, B & Chandrasekhar, Brig & David, Rajasekhar & Kumar, A. Identification of Instructional Design Strategies for an Effective E-learning Experience. 24. 1537-55. (2019).
- [EP46]** M. Godsk, J.B. Bennedsen, R.F. Hougaard *LEARNING DESIGN, LEARNING ANALYTICS, AND LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS ICERI2018 Conference 12th-14th November .2018, Seville, Spain*.
- [EP47]** Bowen Hui, Shannon Farvolden, *WCCCE'17, May 05–06, 2017, Abbotsford, BC, Canada*. © 2017 Association for Computing Machinery. ACM. (2017).
- [EP48]** Toeteneel, Lisette and Rienties, Bart *Analysing 157 Learning Designs using Learning Analytic approaches as a means to evaluate the impact of pedagogical decision-making. British Journal of Educational Technology* (in press). (2016).
- [EP49]** I. D. Nunes and U. Schiel, "Using High Level Activities Net for Learning Analytics of Instructional Design," 2014 IEEE 14th International Conference on Advanced Learning Technologies, Athens, 2014, pp. 383-385. (2014)
- [EP50]** Liu D.YT., Bartimote-Aufflick K., Pardo A., Bridgeman A.J. Data-Driven Personalization of Student Learning Support in Higher Education. In: Peña-Ayala A. (eds) *Learning Analytics: Fundaments, Applications, and Trends. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 94. Springer, Cham. (2017)
- [EP51]** Bjælde, O.E & Lindberg, A.B. Using continuous assessment with feedback loops to generate useful data for learning analytics. In M. Campbell, J. Willems, C. Adachi, D. Blake, I. Doherty, S. Krishnan, S. Macfarlane, L. Ngo, M. O'Donnell, S. Palmer, L. Riddell, I. Story, H. Suri & J. Tai (Eds.), *Open Oceans: Learning without borders. ASCILITE 2018 Geelong* (pp. 53-62). (2018)
- [EP52]** Barriocanal, Elena & Sicilia, M. & Sánchez-Alonso, Salvador & Cuadrado, Juan-José. Agile methods as problem-based learning designs: setting and assessment. *TEEM'18: Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*. 339-346. 10.1145/3284179.3284237. (2018)

[EP53] Q. Zhou, X. Han, J. Yang and J. Cheng, "Design and Implementation of Learning Analytics System for Teachers and Learners Based on the Specified LMS," 2014 International Conference of Educational Innovation through Technology, Brisbane, 2014, pp. 79-82.

[EP54] Wiley, Korah & Dimitriadis, Yannis & Bradford, Allison & Linn, Marcia. From theory to action: developing and evaluating learning analytics for learning design. 569-578. 10.1145/3375462.3375540. (2020)

[EP55] Gašević, Janovic. Detecting learning strategies with analytics: Links with self-reported measures and academic performance. Journal of Learning Analytics,4 (2), 11 3 -128. (2017)

[EP56] Ifenthaler, D., Widanapathirana, C. Development and Validation of a Learning Analytics Framework: Two Case Studies Using Support Vector Machines. Tech Know Learn 19, 221-240 (2014).

[EP57] S. Jia, J. Liu and F. Wu, *Design and Application of a Lesson Planning System to Promote Deep Learning Based on Learning Analytics*, 2018 Seventh International Conference of Educational Innovation through Technology (EITT), Auckland, New Zealand, 2018, pp. 150-155. (2018)

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para dar respuesta a las preguntas de investigación, se decidió realizar una síntesis narrativa basada en el esquema de clasificación definido, mediante tablas, donde cada estudio primario se representa por [EPn°]. La Tabla 6 corresponde a la pregunta de Investigación 1, la Tabla 7 corresponde a la pregunta de investigación 2, la Tabla 8 corresponde a la pregunta de investigación 3 y, por último, la Tabla 9 corresponde a la pregunta de investigación 4.

Tabla 6. PI1: ¿Qué propuestas existen de LA en los cursos de e-learning en educación superior?

<p>Categoría: Algoritmos de Machine Learning. (3 artículos).</p> <p>En [EP27] se utiliza SVM (máquinas de vectores de soporte) como clasificador que predice si los objetivos educativos de un individuo se logran o no. Las entradas del problema son las notas obtenidas por los estudiantes. En [EP57] se da relevancia a los algoritmos de aprendizaje profundo (Deep Learning) para captar los estilos de aprendizaje de los estudiantes. [EP9] utiliza algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado.</p>
<p>Categoría: Datos. (9 artículos).</p> <p>En [EP6] se describe cómo se obtuvieron los datos para el estudio presentado. En [EP16] se muestran diversas medidas de la teoría de gráficos y sugieren que las mismas permiten un análisis en profundidad de la interacción del estudiante. En [EP19] se relata de donde se toman los datos para el análisis. En [EP21] se propone un sistema que recoge los datos de los estudiantes implementando una tecnología NoSQL (mapReduce). El [EP34] propone la recolección de datos por medio de script. El [EP39] recoge datos de: a) Las variables de aprendizaje autorreguladas de los estudiantes, b) Información sobre la interacción con los eventos de aprendizaje en línea, c) rendimiento académico como las notas finales en el curso. En [EP55] y [EP26] estudian un rastreo de datos recuperados sobre una clase de <i>aula invertida</i>. El [EP44] presenta los datos que un LMS debe proveer para LA, materiales de aprendizaje, resultados de evaluación, etc.</p>
<p>Categoría: Herramientas de visualización. (12 artículos).</p> <p>[EP2] analiza los tipos de herramientas de LA existentes y a quienes van dirigidas, [EP3] y [EP7] refieren herramientas de visualización (tableros) destinadas a la mejora del aprendizaje y motivación de los estudiantes. Especialmente en [EP7] se describen las técnicas utilizadas para la construcción de un Tablero. [EP20] se describe una metodología para la construcción de una herramienta en LA. [EP33] propone remodelar la visualización que posee un instructor en el LMS como herramienta para el LA. Los estudios que describen herramientas son: en [EP40] Analytics4Action, [EP43] eLat como herramientas para la visualización de LA, en [EP32] SOLE, en [EP14] se utilizan herramientas tales como Tableau 10.1 y redes entre actividades. [EP50] plataforma SRES (Student Relationship Engagement System) y en [EP23] herramienta LOCO Analyst.</p>
<p>Categoría: Modelos / Framework. (8 artículos).</p> <p>En [EP11] se presenta un modelo de ajuste estudiantil como un ciclo continuo en el que los estudiantes planean, monitorean y ajustan sus actividades de aprendizaje y comprensión sobre estas. En [EP21] se propone un framework en n capas para asesoramiento académico. [EP31] presenta una revisión de algunos modelos. [EP52] propone introducir el LA dentro de la metodología SCRUM. [EP56] muestra un framework holístico donde combina datos (estudiantiles, profesores y de la institución), su interacción con la web social y el entorno de aprendizaje en línea, así como requisitos curriculares. En [EP58] presenta su modelo para LA basado en cuatro dimensiones, datos y entornos, partes interesadas, objetivos y métodos. En [EP8] se analizan: 5-Steps Oblinger Model (Campbel), The LA Cycle (Clow), The 4-dimensions LA Model (Chatti), 7 step LA Model (Siemens) y The Dinamic LA Model (Freitas). [EP47] elabora un MT que ayuda a profesores y estudiantes.</p>
<p>Categoría: Líneas de acción. (6 artículos).</p> <p>En [EP1] se discute que LA mejoraría al contemplar la intención pedagógica, utilizando el LD basado en casos, comprender el contexto del LD para establecer modelos predictivos junto con recomendaciones pedagógicas. [EP2] relata la situación al 2017 de LA en España dando líneas de acción en el desarrollo de LA en Europa. [EP18] Se considera el papel que desempeñará LA -año 2013- para informar la práctica docente en la educación superior, así como las implicaciones para futuras investigaciones en el campo. En [EP30] se propone evaluar las herramientas de LA mediante la usabilidad. [EP36] proporciona detalles de los beneficios del LA como medio para mejorar la retención y el éxito de los estudiantes. [EP41] evalúa condiciones críticas para LA.</p>
<p>No contribuyen. (23 artículos). [EP4], [EP5], [EP9], [EP10], [EP12], [EP13], [EP15], [EP17], [EP22], [EP24], [EP25], [EP28], [EP29], [EP35], [EP37], [EP38], [EP43], [EP45], [EP46], [EP48], [EP49], [EP51], [EP54].</p>

Tabla 7. PI 2: ¿Qué aspectos se tienen en cuenta en el LD en e-learning?

<p>Categoría: Calidad. (3 artículos).</p> <p>El [EP15] se basa en la metodología de LD descrito por Conole, para mejorar la calidad de la experiencia de aprendizaje para los estudiantes. El [EP25] propone el entorno The Learning Designer para garantizar la calidad en el LD. El [EP27] propone como medidas de calidad estrategias de aprendizaje adaptativos.</p>
<p>Categoría: Metodología. (4 artículos).</p> <p>En [EP15] se evalúan distintos cursos, antes y después de considerar el LD, comprueba que después de introducir LD, trabajando en talleres colaborativos, los educadores crearon diseños más creativos y centrados en el estudiante e incluyeron menos actividades asimilativas. El [EP25] promueve las ideas del aprendizaje constructivista y construir un entorno que permita el aprendizaje adaptativo. El [EP7] utiliza la metodología de Diseño Centrado en el Usuario (UCD). [EP35] propone el análisis de redes sociales (SNA), para su marco metodológico Integrado (FMI) identificando comunidades de aprendizaje (CoP), creando una estructura para planificar una intervención adecuada.</p>
<p>Categoría: Proceso. (3 artículos).</p> <p>El [EP15] menciona un nuevo proceso para diseñar el currículo y los módulos de mapeo. El [EP45] identifica estrategias de diseño instruccional: asistencia técnica, aprendizaje basado en problemas, juegos, entre otros. El [EP48] habla de un proceso de <i>Mapeo de módulos</i> integral, donde utiliza los datos de LD para mejorar la calidad.</p>
<p>Categoría: Marco de trabajo. (2 artículos).</p> <p>El [EP4] propone un marco de LD (curricular) describiendo 3 de las 4 fases con resultados. El [EP5] establece un marco para evaluar el aprendizaje de alta calidad en educación superior (consta de ejemplos y diseños genéricos de aprendizaje y comprenden una representación visual con descripciones textuales).</p>
<p>Categoría: Modelo. (9 artículos).</p> <p>[EP3] referencia a modelos de diseño instruccional como ADDIE. En [EP11] confía en el modelo de aceptación de tecnología (TAM) y en el diseño de métodos mixtos. [EP19] arroja 4 patrones de LD distintivos: constructivista, orientado a la evaluación, variedad equilibrada y módulos social constructivistas. [EP25] propone The Learning Designer (entorno de soporte), que agrega un nuevo componente: un micro mundo para el dominio del LD. [EP46] presenta un modelo de LD altamente estructurado llamado <i>ReTaught</i>. [EP51] presenta un modelo donde combina bucles de retroalimentación y la evaluación continua. [EP49] presenta un modelo de diseño instruccional The High Level Activities Net (HLAN) estructura de red para diseñar y controlar el proceso de aprendizaje. [EP32] presenta el modelo LD denominado SOLE. [EP50] propone un enfoque para el apoyo estudiantil basado en datos.</p>
<p>Categoría: Taxonomía. (7 artículos).</p> <p>[EP19], [EP15], [EP6], [EP14], [EP13] y el [EP48] mencionan la taxonomía de OULDI (Open University Learning Design Initiative) que identifica 7 tipos de actividades de aprendizaje (asimilativas, buscar y manejar información, comunicativas, productivas, experimentales, interactivas y de evaluación). El [EP3] refiere la Taxonomía de Bloom.</p>
<p>Categoría: Herramientas. (4 artículos).</p> <p>En [EP46] se propone el desarrollo de: "Barómetro" en el Grade Center en Blackboard Learn para monitorear: 1) actividad en línea de los estudiantes, 2) interacción en línea, 3) rendimiento académico y 4) la utilidad del LMS. El [EP16] describe la utilización del Careers Challenge, colección de cinco páginas web (llamadas actividades) que contienen interacciones de aprendizaje como, por ejemplo: elegir entre opciones. El [EP12] presenta un análisis de diseño a nivel conceptual, una visualización basada en el conocimiento, la cual está integrada en una herramienta de creación de LD, edCrumble. También menciona a Web Collage, LDSE y Educational Design Studio. El [EP51] trabaja sobre LD (LDTool).</p>
<p>Categoría: Perspectiva pedagógica teóricas. (9 artículos).</p> <p>[EP1] propone la revisión del punto de control y el análisis de procesos del LD basado en casos. En [EP11] se identifica la retroalimentación y la autoevaluación respaldadas por la tecnología como prometedoras desde un punto de vista educativo. [EP31] plantea mejorar los diseños orientados a proyectos centrados en el estudiante (desarrollo de conocimiento, aprendizaje basado en proyectos, aprendizaje de investigación, aprendizaje basado en problemas). [EP14] propone un enfoque pedagógicamente sólido de los datos, para decidir a qué variables asistir, cómo generalizar los resultados y cómo traducir sus hallazgos en acciones. [EP29] menciona que el aprendizaje debe ser guiado por la tecnología (TEL). En [EP39] se propone combinar las teorías de aprendizaje autorreguladas con el LA. El [EP15] tiene como objetivo determinar si la combinación de un enfoque colaborativo en red en la etapa inicial de diseño, aumentado con visualizaciones, ha cambiado la forma en que los educadores diseñan sus cursos. [EP4] propone el análisis curricular (CA) como nueva disciplina. En [EP52] utiliza un enfoque basado en problemas para un curso.</p>
<p>Categoría: Tareas/actividades. (3 artículos).</p> <p>[EP14] identifica patrones a partir de las actividades de los estudiantes (número de clics, publicaciones de discusión o ensayos). El [EP51] presenta tres ejemplos de actividades de evaluación continua: 1) con bucles de retroalimentación automatizados, 2) retroalimentación formativa a través de rúbricas, 3) con doble circuito de retroalimentación. [EP49] presenta (HLAN), red de estructura para diseñar y controlar el proceso de aprendizaje.</p>
<p>Categoría: Evaluación del LD. (4 artículos).</p> <p>[EP13] describe un taller participativo, donde evaluaron de manera colaborativa y crítica el enfoque de LD en Open University. [EP19] evalúa el diseño con análisis de agrupación y correlación. [EP37] evalúa en qué medida el tiempo de participación de los estudiantes se alineó con el LD del instructor. [EP54] describe el desarrollo y la evaluación de LA para el LD, utiliza una metodología basada en el diseño centrada en el diálogo entre las partes.</p>
<p>No contribuyen. (28 artículos). [EP2], [EP8], [EP9], [EP10], [EP17], [EP18], [EP20], [EP21], [EP22], [EP23], [EP24], [EP26], [EP28], [EP30], [EP33], [EP34], [EP36], [EP38], [EP40], [EP41], [EP42], [EP43], [EP44], [EP47], [EP53], [EP55], [EP56], [EP57].</p>

Tabla 8. PI 3: ¿Existe sinergia entre LA y LD?

<p>Categoría: Modelo. (2 artículos).</p> <p>[EP9] propone el modelo CLAD (Contextualizable Learning Analytics Designs) la combinación de LA y LD que se puede adaptar de manera flexible para diferentes contextos de aprendizaje. [EP34] presenta un modelo que relaciona conceptos aplicados en la práctica de scripting y monitoreo para mejorar decisiones pedagógicas de los profesores mediante LA.</p>
<p>Categoría: Marco de trabajo (MT). (10 artículos).</p> <p>[EP3] presenta un MT para la interacción entre LA y LD: Interoperabilidad del LD, uso de indicadores, compartir conocimiento del diseño. [EP14] trabaja con el marco conceptual desarrollado por Conole. [EP20] propone un MT utilizando: Design Thinking, y Human Computer Interaction. [EP24] propone marco conceptual. [EP31] analiza distintos requerimientos a tener en cuenta en un futuro MT. [EP35] utiliza un Integrated Methodological Framework para su estudio. [EP36] proporciona un MT en el que sugieren los puntos a tener en cuenta para que el éxito del estudiante sea más probable. [EP54] propone el MT T-Glade para distintos contextos. [EP43] propone un marco conceptual en el que deben interactuar los profesores y los estudiantes. [EP41] identifica un MT con 6 dimensiones críticas: partes interesadas, objetivos, datos, instrumentos, restricciones externas y limitaciones internas.</p>
<p>Categoría: Metodología. (3 artículos).</p> <p>En [EP20] y [EP46] proponen una metodología de trabajo para alinear LA y LD. En [EP48] refiere que las elecciones de LD realizadas por los profesores influyen en los procesos de aprendizaje y el rendimiento del aprendizaje a lo largo del tiempo.</p>
<p>Categoría: Herramientas. (6 artículos).</p> <p>[EP9] en la presentación del modelo CLAD utiliza AcaWriter, herramienta basada en la web que proporciona comentarios formativos sobre movimientos retóricos por escrito. [EP10] Propone la herramienta Loop. [EP28] utiliza una plataforma de aprendizaje digital Curtin Challenge la que apoya el aprendizaje individual y en equipo a través de experiencias de aprendizaje gamificadas. [EP33] plantea la construcción de una herramienta Visual Interface Murphing, dinámica, cuya característica es actuar sobre la interfaz de un sistema de gestión de aprendizaje para modificar la apariencia de los objetos de aprendizaje. [EP38] presenta un modelo teórico para una herramienta LA4LD, permite a profesores y estudiantes obtener comentarios sobre actividades de aprendizaje en tiempos de ejecución. [EP57] desarrolla un sistema de planificación de lecciones eBag y presenta las actividades a través de herramientas visuales.</p>
<p>Categoría: Intervención en tiempo de ejecución. (11 artículos).</p> <p>[EP3], [EP7], [EP11], [EP16], [EP24], [EP28], [EP33], [EP40], [EP44], [EP43], [EP49] todos estos estudios proponen que se debe intervenir en un curso en tiempo de ejecución.</p>
<p>Categoría: Propuestas. (8 artículos).</p> <p>[EP12] ampliar la herramienta edCrumbe a un nivel de diseño extremadamente fino. [EP39] analizar las experiencias de aprendizaje combinando la información obtenida con datos auto informados basados en marcos teóricos, como la autorregulación, con los obtenidos por métodos como el registro de las interacciones entre los estudiantes y los eventos del curso. [EP50] presenta el Sistema SRES, centrado en la relación entre los maestros y sus estudiantes, tanto en términos de recopilación y conservación de datos locales significativos como de acciones de apoyo. [EP26] examinar las características secuenciales y temporales de las estrategias de aprendizaje e investigar su asociación con la retroalimentación. [EP32] argumenta que el LA efectivo depende de LD bien estructurados y mapeados de manera efectiva. [EP1] sostiene que LD es el marco de trabajo para LA. [EP17] integrar LD y LA. En [EP22] se discute la relación de LA y LD en términos de factores comunes.</p>
<p>No contribuyen. (23 artículos). [EP2], [EP4], [EP5], [EP6], [EP8], [EP13], [EP15], [EP18], [EP19], [EP21], [EP23], [EP25], [EP27], [EP29], [EP30], [EP37], [EP42], [EP45], [EP47], [EP51], [EP52], [EP55], [EP56].</p>

Tabla 9. PI4; ¿Qué tipo de investigación se usó en el artículo leído?

<p>Categoría: Evaluación. (8 artículos).</p> <p>[EP4] evalúa una herramienta para implementar el análisis curricular con 124 profesores. En [EP7] se evalúa un tablero con intervención estudiantil. [EP13] evalúa la relevancia y la idoneidad de las estrategias de LD en nuevos contextos en un taller participativo con 34 profesionales de la educación de cinco países africanos. [EP14] evalúa LD y LA utilizando una combinación de visualizaciones y análisis de redes sociales, sobre 23 módulos de educación a distancia de pregrado y sus 40.083 estudiantes. [EP23] Evalúa la herramienta LOCO Analyst. En [EP48] se evalúa un diseño de aprendizaje en 151 módulos y 111.256 estudiantes con la satisfacción y el rendimiento de los estudiantes mediante modelos de regresión múltiple. En [EP49] presenta una investigación con 17 clases de un curso a distancia, con un total de 673 estudiantes donde se utiliza la red HLAN. En [EP54] se describe una evaluación del LA para LD.</p>
<p>Categoría Propuesta de solución. (12 artículos).</p> <p>[EP10] presenta la herramienta Loop. [EP21] propone un framework en LA. [EP24] propone un framework de LA y LD. En [EP25] se explica el proyecto Learning Design Support Environment. En [EP33] propone renovación de una interfaz. [EP34] presenta un modelo de monitoreo consiente del guion. En [EP38] se propone la herramienta LA4LD. En [EP41] presenta un marco de diseño genérico como guía para LA. [EP43] propone investigar y luego desarrollar formas en que los datos del LA puedan ser más útiles para los profesores académicos en educación superior. En [EP53] se describe un sistema THEOL LMS. En [EP57] se diseñan actividades de enseñanza para promover el aprendizaje profundo. En [EP42] se describe el modelo de referencia de LA (Chatti).</p>
<p>Categoría: Comunicar experiencia. (6 artículos).</p> <p>[EP18] presenta hallazgos iniciales de la investigación con el personal asociado a la enseñanza y el aprendizaje en la Universidad de Melbourne identificando necesidades y los usos potenciales de LA para mejorar los resultados educativos. En [EP27] se comunica el algoritmo utilizado (SVM) para clasificar si el estudiante alcanzará sus objetivos. En [EP37] se investiga en qué medida el tiempo de participación de los estudiantes se alineó con el diseño de aprendizaje. En [EP45] se identifican estrategias de diseño instruccional. En [EP46] se documenta una metodología de desarrollo educativo. En [EP51] describe como la combinación de bucles de retroalimentación y evaluación continua puede mejorar el aprendizaje de los estudiantes.</p>

Categoría: Validación. (18 artículos).

[EP6] presenta un estudio exploratorio en el cual utiliza aprendizaje automático supervisado y no supervisado para el mapeo de las taxonomías. [EP9] demuestra cómo desarrollar aplicaciones de LA escalables que puedan atender a un gran número de estudiantes. [EP11] Utiliza el modelo de aceptación de tecnología y una muestra de 484 estudiantes de pregrado, identificando una implementación exitosa de la retroalimentación y autoevaluación entre pares. [EP12] realiza un estudio de usuarios dentro de distintas asignaturas para comparar el uso de la herramienta edCrumble de diseño con y sin la visualización. [EP15] compara los LD de 80 cursos que se desarrollaron antes de la introducción del LD en la Open University con los diseños de 68 cursos que se produjeron después de introducir LD. [EP16] muestra un estudio de caso (e.c.) con 3550 usuarios, en donde la secuencia de navegación y el análisis de gráficos de red demuestran una posible aplicación del LD. En [EP19] se compara cómo se diseñaron 87 módulos y cómo esto impactó el comportamiento (estático y dinámico) del LMS y el rendimiento del aprendizaje. En [EP20] se presenta un e.c. donde se adoptó una metodología de una herramienta de asesoramiento académico. En [EP26] se examinaron actividades en línea previas a la clase de un aula invertida. [EP28] es un e.c. con 3.550 usuarios, donde la secuencia de navegación y el análisis de gráficos de red demuestran el potencial de la sinergia entre LA y LD. En [EP35] presenta un e.c. donde utiliza un marco metodológico. [EP39] presenta un e.c. en un curso con 145 estudiantes con actividades de aprendizaje autorreguladas. [EP40] es un e.c. que utiliza el modelo de aceptación de la tecnología de los profesores. En [EP47] presenta un e.c. con 69 participantes en un curso para poner en práctica un marco metodológico. En [EP50] se describe un e.c. de la aplicación SRES, enfoque centrado en el ser humano para LA. En [EP52] se presenta un e.c. destinado a introducir LA en un diseño de instrucción para cursos de Ingeniería de Software Avanzado utilizando un enfoque de aprendizaje basado en problemas. En [EP55] se describe un e.c. utilizando 144 estudiantes con un diseño de aula invertida. En [EP56] describen 2 e.c. para identificar enfoques alternativos para el análisis de datos y determinar la validez y precisión de un marco de LA.

Categoría: Opinión. (13 artículos).

En [EP1] se examina conceptos de LA y LD y cómo pueden servir para mejorar la comprensión y la evaluación de la intención de enseñanza y la actividad del estudiante, propone al LD como marco de trabajo para LA teniendo en cuenta el contexto. [EP2] sugiere una lista de acciones para las LA: a) desarrollar una visión común en Europa, b) desarrollar una hoja de ruta, c) asignar responsabilidades. [EP3] sostiene que se necesita algún tipo de orden para poder colaborar con colegas en el diseño de actividades de aprendizaje y tener éxito. En [EP5], [EP22], [E32] exploran la relación entre LA y LD. [EP8] elabora estado del arte del LA. [EP17] enfatiza la integración de LA con LD. [EP29] analizar los principales desafíos que deben superarse al diseñar entornos de aprendizaje educativo inteligentes. En [EP30] proporciona evidencias que las herramientas de LA son activo valioso. [EP31] reflexiona sobre LA. En [EP36] discute el uso del LA para identificar y personalizar las intervenciones de aprendizaje de los estudiantes. [EP44] reflexiona sobre si las Universidades tiene el personal capacitado para realizar LA.

4.1 Amenazas a la validez

En esta sección se analizan las potenciales amenazas considerando las categorías propuestas en [9]:

- *Validez del constructo*: alude a la relación entre las medidas utilizadas en el estudio y las teorías en que se basan las preguntas de investigación [10]. En nuestro estudio, se refiere a la identificación de documentos dependientes de la terminología utilizada en nuestra cadena de búsqueda, la que se discutió previamente en el equipo de investigación, utilizando los conceptos propuestos en [1-5].
- *Validez interna*: muestra la dependencia entre los resultados del Estudio de Mapeo Sistemático, con los investigadores que intervinieron en el mismo [9]. Para mitigar este tipo de amenazas se creó el protocolo de revisión de investigación. Los artículos fueron revisados por dos investigadores, y luego se utilizó la pregunta de investigación 4 como doble control en la clasificación. Cuando se detectaron inconsistencias, se discutió entre los investigadores la correcta clasificación.
- *Validez externa*: la clave es agregar la mayor cantidad de literatura disponible [10], para lo cual se seleccionaron artículos de 5 fuentes digitales (Scopus, IEEE Xplorer, ACM, Google Academic y ProQuest) garantizando su variedad.
- *Fiabilidad*: los principales problemas que pueden constituir una amenaza para la fiabilidad se relacionan con el sesgo de publicación, el sesgo de selección, la inexactitud en la extracción de datos y la clasificación errónea. Se ha definido cuidadosamente el protocolo de revisión de artículos, el cual fue consensuado por los investigadores y supervisado por el Investigador responsable, los criterios de inclusión y exclusión definidos sirven a este propósito.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un Estudio de Mapeo Sistemático de la literatura SMS para establecer el estado del arte con respecto a la Analítica del Aprendizaje LA, a los Diseños de Aprendizaje LD y a la relación sinérgica existente entre los dos conceptos. Luego de analizar los estudios primarios se concluye que:

- De los artículos que aplicaron a la PI 1, el 35% investiga sobre herramientas de visualización, en su mayoría tableros, presentándolas como forma de involucrar y apoyar a los estudiantes en su aprendizaje, mostrando la evolución, compromiso y resultados previstos para las motivaciones de aprendizaje. El 12 % refieren distintos métodos de obtención de datos. Otro 12 % presentan distintos marcos de trabajo o modelos utilizados en el LA, involucrando a estudiantes, profesores e instituciones. En la mayoría de los trabajos se promueve la idea que LA permite, a los actores involucrados, comprender y predecir mejor el aprendizaje y el rendimiento.
- De los artículos que aplicaron a diseños de aprendizaje, PI 2, se desprende que aun cuando el uso de tecnologías digitales está muy extendido y en aumento no siempre está optimizado para un aprendizaje efectivo. Para solucionar este problema, el 69 % de los artículos ofrecen distintas propuestas (metodologías, procesos, marcos de trabajo, modelos y tareas o actividades). El 30 % de los estudios mencionan distintas perspectivas pedagógicas teóricas para sustentar sus diseños de aprendizaje y el 24 % describe las taxonomías aplicadas en el LD.
- Los artículos que aplicaron a la PI 3 informan la convergencia del LA y LD dentro de los entornos investigados. En el 62 % de ellos se estudian marcos de trabajos integrados, métodos y herramientas, el 32 % resaltan la interacción en tiempo de ejecución y el 24 % plantean solo propuestas.
- Respecto a la PI 4, de los 57 artículos revisados, el 32 % son validaciones de propuestas involucrando distintos módulos y una cantidad importante de estudiantes. El 23 % expresan opiniones (la mayoría sobre la integración entre LA y LD). El 21 % de los artículos proponen soluciones. El 14 % son evaluaciones (herramientas o la interacción entre LD y LA). El 10 % restante comunican experiencias.

Se destacan como trabajos futuros: 1) analizar los datos que brinda la plataforma que ofrece la Universidad de Morón para el dictado de cursos a distancia, y 2) aplicar una metodología que contemple los diseños de aprendizaje y las analíticas de aprendizaje en un curso de primer año de las carreras de Informática.

REFERENCIAS

- [1] New Media Consortium (NMC), The Horizon Report 2011, EDUCASE Learning Initiative (ELI) y Consortium for School Networking (CoSN) (2011).
- [2] SoLAR (2019, mayo 20). Recuperado: <https://www.solaresearch.org/events/lak/>
- [3] Siemens G. y Baker R. "Learning Analytics and Educational Data Mining: towards communication and collaboration", Proceeding of de second International Conference on Learning Analytics and Knowledge ACM Digital Library. pp. 252-254. 2012,
- [4] Mangaroska y Giannakos "Learning Analytics for Learning Design: Towards Evidence-Driven Decisions to Enhance Learning" Springer International Publishing AG 2017. En É. Lavoué et al. (Eds.): EC-TEL 2017, LNCS 10474, pp. 428-433, 2017.
- [5] Koper, R and Bennett, S. "Learning Design: Concepts". In Handbook on Information Technologies for Education and Training. Heidelberg: Springer. Pp 135-154. 2008.
- [6] Lockyer L., Heathcote E., Dawson S. "Informing Pedagogical Action Aligning Learning Analytics with Learning Design" *American Behavioral Scientist* 57(10) pp.1439-1459. 2013.
- [7] Kitchenham B., Budgen D. y Brereton P. "Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews", Chapman and Hall 1 st. Editon. Chapman and Hall/CRC. USA. 2015.
- [8] Wieringa R., Maiden N., Mead N. y Rolland C. "Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion". *Requir. Eng.* 11(1), pp 102-107. 2005.
- [9] Wohlin C., Runeson P., Hst M., Ohlsson M.C., Regnell B. y Wessln A. "Experimentation in Software Engineering". Springer Publishing Company. 2012.
- [10] Borg, M., Runeson, P. y Ardö, A., "Recovering from a decade: a systematic mapping of information retrieval approaches to software traceability". *Empirical Softw. Eng.* 19, pp. 1565-1616. 2014.

Método de mejora continua de Interfaces gráficas de usuario en aplicación web a través de sistemas inteligentes

Oswaldo Germán Fernández¹

Pablo Pytel²

María Florencia Pollo-Catteneo³

Universidad Tecnológica Nacional
Argentina

La Interfaz Gráfica de Usuario GUI representa el mecanismo más común en la interacción humano-computador y, por lo tanto, su correcta construcción es una tarea importante. Esto se ve reflejado al punto en que gran parte de los proyectos software fracasan a causa de una baja aceptación por parte de los usuarios. Las técnicas, metodologías, herramientas y principios para mejorar una GUI han sido objeto de interés de investigadores y organizaciones a lo largo del tiempo, pero debido a la baja tasa de éxito resultante, una reciente tendencia consiste en experimentar con mayor cantidad de alternativas de interfaces, bajando su costo de construcción por medio de la automatización y la Inteligencia Artificial. Entonces, ¿cómo podría articularse dicha tendencia en un proceso ingenieril ordenado? ¿Cómo serían las fases y actividades necesarias para que, considerando las particularidades de cada proyecto, se establezca un proceso de mejora continua que facilite alcanzar objetivos determinados? En este trabajo se presenta un método que, mediante la utilización de Algoritmos Genéticos Interactivos, establece un proceso de mejora continua semi-automático para una página de aterrizaje. El método propuesto se aplica a un caso de estudio, a través de una página de aterrizaje de una empresa de fumigación y control de plagas. La aplicación del método provee resultados positivos, ayudando a la página de aterrizaje a alcanzar los objetivos para los cuales fue diseñada.

¹ Ingeniero en Sistemas de información, Investigador Tesista del Grupo GEMIS.

Contacto: osvaldo.g.fernandez@gmail.com

² Grupo GEMIS.

Contacto: ppytel@gmail.com

³ Grupo GEMIS.

Contacto: flo.pollo@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Incluso antes de la invención de la escritura, los seres humanos han creado interfaces que han servido como recursos de apoyo para satisfacer sus necesidades de interacción [1], y con el transcurrir del tiempo, estas han ido evolucionando al compás del desarrollo de la capacidad cognitiva y el desarrollo de los seres humanos [2]. Con el surgimiento de la pantalla digital, nace una nueva noción de interfaz de usuario, definida como la parte de un computador que el usuario puede ver, oír o tocar, o en términos más sencillos, aquella que puede entender y dirigir [3, 4]. La función de esta interfaz es hacerle ver al usuario de lo que es capaz el producto, por lo que se considera parte esencial de cualquier aplicación de software.

Por otro lado, la Interfaz Gráfica de Usuario GUI representa el mecanismo más común en la interacción humano-computador, y dado su protagonismo, puede incidir en el éxito que obtendrá una aplicación de software. Es por lo anterior, que la correcta construcción de las GUIs es una tarea de vital importancia, y que se encuentra atravesada por diversidad de disciplinas y actividades [5-7].

Ramírez et al. [5] refieren la contundencia del vínculo entre las GUIs y el éxito de un software, mencionando que cerca del 70% de los proyectos de software fracasan a causa de una baja aceptación por parte de los usuarios. Entonces es correcto mencionar que, una interfaz correctamente diseñada es vital para el éxito de la aplicación que la contiene [6]. Diversos estudios respaldan la relación entre la calidad de la GUI y la credibilidad de la aplicación [7], la percepción de integridad [8], la lealtad del cliente [9], la intención de visitar [10], y costos más bajos en la adquisición de cliente e incremento en su retención [11].

La GUI, además, adquiere mayor relevancia debido a su impacto sobre la usabilidad y la ergonomía, entendida esta última como la usabilidad orientada a aspectos fisiológicos en dispositivos táctiles y móviles [12]. Es por ello, que se ha descrito que cerca del 67% de los usuarios son más propensos a usar interfaces adaptadas para dispositivos móviles [13].

Los beneficios de una apropiada GUI son reconocidos por diversas organizaciones que proveen software a nivel mundial, y ello se evidencia en que el 87% de una muestra de 400 compañías sostiene que la interfaz es importante o muy importante, 85% de los directivos fundamentan sus decisiones en la información que proviene de disciplinas de diseño de interfaz, y el 70% de las empresas emergentes maduras y el 100% de los unicornios (empresas con valuación superior a mil millones de dólares), buscan especialistas en diseño de interfaz y experiencia de usuario [14].

Debido a los aspectos mencionados, las GUIs han sido objeto de interés de investigadores y organizaciones a lo largo del tiempo, sin embargo, las propuestas de mejoramiento de las mismas derivadas del interés referido, no han asegurado su éxito, lo cual se refleja en que el 80% del tiempo el diseñador está equivocado respecto a lo que el usuario quiere [15] y que solo un tercio de las ideas implementadas por compañías con trayectoria como Microsoft han mejorado las métricas para las que fueron implementadas [16].

En este contexto, con el objetivo de superar los obstáculos mencionados, se propone experimentar con una mayor cantidad de alternativas de GUIs bajando su costo de construcción por medio de la automatización y, analizando el impacto de la Inteligencia Artificial en la construcción de interfaces eficaces. Por consiguiente, el presente trabajo propone el desarrollo de un método que, de ser seguido por un Profesional en Informática, facilite la implementación de un proceso de mejora continua de GUIs mediante la aplicación de tecnologías de la Inteligencia Artificial.

Específicamente, la propuesta se encuentra orientada a la mejora continua de páginas de aterrizaje (*Landing Pages*) buscando combinar de manera holística los beneficios de las técnicas actualmente disponibles como las ventajas aportadas por los sistemas inteligentes.

2. MÉTODO

A partir de la problemática identificada en la sección anterior, la solución propuesta consiste en un método que busca guiar a profesionales en informática y especialistas en interfaces de usuario en la

implementación de un proceso de mejora continua sobre las GUIs de aplicaciones web a través de sistemas inteligentes. El método detallado y el análisis en este caso se enfoca en las denominadas *páginas de aterrizaje*.

Una página de aterrizaje es una plataforma visual donde las organizaciones pueden atraer visitantes de una forma más cómoda y concretar ventas [17]. Estas páginas son muy apropiadas para procesos de mejora continua, principalmente porque representan, en muchas ocasiones, la primera interacción de la audiencia con la aplicación, y, sumado a esto, el resultado de dicha interacción puede ser evaluado con métricas bien establecidas en la industria [18]. El método entonces será aplicado a la página de aterrizaje de una empresa de Fumigación y Control de plagas.

El fenómeno de la percepción en las GUIs se ha desarrollado en diversos estudios que analizan aspectos como la complejidad [19, 20], simetría [21], color [22], o varias de estas características de forma combinada [23]. Asimismo, se han descrito características inherentes a usuario como lo son las variables sociodemográficas [24, 25].

Sin embargo, para el presente estudio se utiliza el enfoque propuesto por Kohavi y Longbotham [15], quienes consideran que la percepción puede ser medida a través de indicadores claramente definidos, los cuales reflejan el comportamiento de los usuarios en la plataforma web y pueden mencionarse: la tasa de conversión, sesiones por usuario, duración de la sesión, tasa de rebote y páginas visitadas por sesión.

El método propuesto describe las fases y actividades necesarias para identificar los objetivos de la página de aterrizaje, lo que luego, permite determinar los elementos de la GUI cuyos atributos son intervenidos. Posteriormente, el método lista las fases y actividades que son seguidas por el profesional en informática y por el especialista en interfaz de usuario con el fin de construir herramientas que automaticen la intervención de estos elementos, como así también construir herramientas que automaticen la evaluación y puesta en producción de las GUIs intervenidas, bajo dos propuestas arquitectónicas que son contingentes a las necesidades del proyecto. El método propuesto es llevado a cabo por dos actores:

- *Profesional en Informática* (Informático): este rol es el responsable principal de la construcción de todas herramientas mencionadas en el párrafo anterior (e incluso responsable de la adquisición de estas herramientas en el mercado, si existiesen y es considerando pertinente). Es por esta razón que el perfil y la experiencia de este rol se encuentre firmemente orientada al desarrollo web. Además, es deseable que el Profesional en Informática cuente con experiencia en la aplicación de metodologías de software como así también en la interpretación de requerimientos.
- *Especialista en Interfaz de Usuario*: Se entiende como *Especialista en Interfaz de Usuario* o *Especialista en Interacción* a alguien cuyo dominio de trabajo son las formas en que los usuarios interactúan con y a través de los computadores [26]. Esta definición amplia considera que el rol comprende disciplinas de interacción visual gráfica (como el diseño gráfico) pero la excede, incluyendo también conocimientos holísticos de ergonomía e incluso ideación de producto y negocio [27].

De hecho, bajo el presente método, el Especialista en Interfaz de Usuario es el responsable de identificar objetivos organizacionales y comprender cómo la página de aterrizaje colabora a los mismos. Esta información es indispensable para determinar de qué forma dicha página puede ser intervenida por las herramientas que serán posteriormente construidas por el Profesional en Informática.

Es importante destacar que, dependiendo del tamaño y complejidad de la página de aterrizaje y de la organización a la que pertenece, estos dos roles pueden ser cubiertos por muchas personas. Inclusive, este método considera posible que ambos roles sean satisfechos por la misma persona.

2.1 Algoritmos Genéticos Interactivos

Un Algoritmo Genético consiste en una población de soluciones a un problema que es mantenido en forma de un *cromosoma*, el cual es una cadena de caracteres que codifica una solución a un problema [28].

Para el método propuesto, una variación de la página de aterrizaje es una posible solución, codificada en un cromosoma cuya estructura se compone de tres elementos: gen de Permutación GP, gen de Color GC (tres genes por cada color, correspondientes a tono -H-, saturación -S- y luminosidad de color -L-) y gen de Estilo GE que refleja modificaciones por ejemplo las jerarquías tipográficas.

Además, se almacenan otros elementos como generación del cromosoma (permite identificar las generaciones y no mostrar cromosomas antiguos, además, permite la mutación y el cruzamiento), cantidad de veces solicitado (cantidad de usuarios solicitando el cromosoma), ID de seguimiento analítica (es el ID que vincula a la GUI alternativa con la herramienta analítica), resultados de desempeño (medidas vinculadas con los indicadores definidos en el acta de inducción: tasa de rebote, sesiones por usuario y tasa de conversión), puntaje total (puntaje derivado de aplicar la función aptitud al cromosoma y realizar su evaluación descrita más adelante) y el indicador de bajo rendimiento (el cual sirve para no exponer un cromosoma de manera prolongada a la audiencia cuando muestra bajo desempeño). Mirjalili [29], describe las siguientes fases para un Algoritmo genético:

1. *Población inicial*: el algoritmo genético comienza con una población generada de manera aleatoria. Esta población incluye múltiples soluciones.
2. *Selección*: la selección natural es la inspiración principal de este algoritmo, por lo cual utiliza una función de aptitud que le asigna un puntaje a cada individuo, de acuerdo con su desempeño en el entorno. Los mejores individuos son seleccionados para la creación de la próxima generación.
3. *Cruzamiento*: luego de seleccionar a los individuos en la operación anterior, dos soluciones (padres), combinan sus características en dos nuevas soluciones (hijos).
4. *Mutación*: es el último operador evolutivo, en el que uno o múltiples genes son alterados con el fin de mantener la diversidad de la población mediante la introducción de aleatoriedad.

Sobre esta base, un Algoritmo Genético Interactivo AGI es el que incluye a la evaluación humana en el proceso de optimización [30]. Durante la operación de selección, se emplea una función aptitud donde interviene la interacción con usuarios. Si bien existen ejemplos de implementación exitosa de AGIs en el dominio de mejora de GUIs [31], los mismos consisten en herramientas privadas con limitaciones referenciadas por los mismos autores.

Muchas de estas limitaciones no son sobre la herramienta en sí, sino sobre cómo ésta se define y se aplica para cumplir con el objetivo planteado. Es por esta razón que enmarcar a la herramienta en un proceso ingenieril resulta imperativo. De hecho, es consustancial a la Ingeniería de Sistemas de Información la eficaz integración de actividades y medios (como es, en este caso, la herramienta de AGIs) [32]. Para ello, es posible aplicar actividades provenientes de diferentes ingenierías como son la Ingeniería en Sistemas de Información [32], la Ingeniería del Software [33] y la Ingeniería de Requisitos [34].

2.2 Estructura general del método propuesto

El método propuesto se denomina Método de mejora continua de Interfaces Gráficas de Usuarios en aplicaciones web a través de sistemas inteligentes, de ahora en adelante llamado Método de mejora continua de GUIs. La propuesta de método se compone de dos partes: estructura general y descripción de fases y actividades, y de 10 fases, como se observa en la Figura 1.

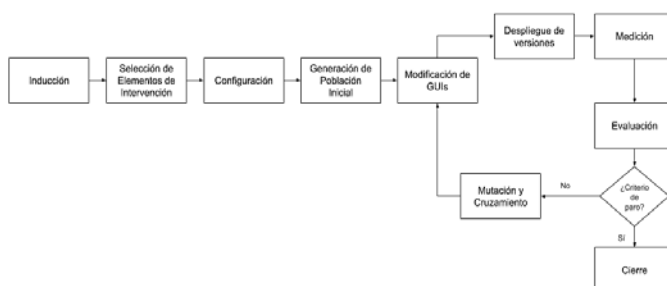


Figura 1. Método de mejora continua de GUIs

1. *Fase de Inducción*: Su objetivo es identificar a las personas involucradas en el proyecto de mejora continua (entre ellos, a los actores principales *Profesional en Informática y Especialista en Interfaz de Usuario*). Su objetivo también es identificar el alcance de la página de aterrizaje, su audiencia, su misión, sus objetivos y los indicadores asociados a éstos.
2. *Fase de Selección de los Elementos de Intervención*: Esta fase busca identificar los elementos a ser intervenidos por el método, siguiendo criterios establecidos y restricciones de negocio.
3. *Fase de Configuración*: Es una fase de extrema importancia, ya que vincula el campo de las disciplinas de Interfaz de Usuario con las de la Ingeniería en Sistemas de Información. A partir de la información recolectada, busca vincular los elementos de la fase 2 con su representación en el código fuente. También se busca consensuar las primeras decisiones respecto a la arquitectura del método y los parámetros intervinientes en las próximas fases.
4. *Fase de Generación de Población Inicial*: En esta fase se determina la estructura de un cromosoma de acuerdo con las características del proyecto. Se crean, además, los cromosomas de la primera generación de GUIs a ser evaluada.
5. *Fase de modificación de las GUIs*: Es la fase en donde las modificaciones propiamente dichas toman lugar. Se describe cómo crear e intervenir distintas versiones de la página de aterrizaje, de acuerdo con la alternativa arquitectónica elegida previamente.
6. *Fase de Despliegue de Versiones*: Su objetivo es que las GUIs intervenidas estén disponibles para la audiencia, junto con los mecanismos de medición pertinentes.
7. *Fase de Medición*: Esta fase actúa de manera prolongada por una cantidad de tiempo definida, y su objetivo es medir las interacciones del usuario en ese lapso, considerando a la audiencia y los indicadores identificados en la fase 1. A lo largo de esta fase también alertas pueden ser generadas para indicar anomalías en el funcionamiento del método.
8. *Fase de Evaluación*: Una vez concluido el lapso de la fase 7, se procede a asignar puntajes de desempeño a las interfaces intervenidas, de acuerdo con una función denominada Función aptitud.
9. *Fase de Cruzamiento y Mutación*: El objetivo de esta fase es obtener una nueva generación (es decir, un nuevo grupo de GUIs intervenidas) que obtengan características visuales compartidas de GUIs anteriores cuyo desempeño fue superior. Además, esta fase espera añadir nuevas modificaciones en el nuevo grupo de GUIs, con la finalidad de explorar el efecto de nuevos fenómenos de percepción en la audiencia.
10. *Fase de Cierre*: Cuando el criterio de paro se cumple, los cambios en la GUI resultante deben ser documentados y analizados. La GUI es establecida entonces como la página de aterrizaje de forma permanente.

Es necesario mencionar que, al tratarse de un método de mejora continua, la fase Mutación y Cruzamiento deriva en la fase Modificación de GUIs de manera cíclica, y alternativamente, el método provee criterios de paro que pueden derivar en la fase de cierre.

3. RESULTADOS

Para la validación del método, se utiliza el caso de una organización nacional proveedora de servicios de saneamiento y control de plagas, y en este caso, la página de aterrizaje cumple un rol fundamental en la adquisición de nuevos clientes. La empresa en cuestión tiene 30 años de antigüedad, dedicada a realizar las actividades mencionadas, siendo sus clientes empresas de los ámbitos públicos y privado, prestando sus servicios a fábricas, depósitos y oficinas comerciales.

La organización cuenta con campañas en línea dirigidas a su actual página de aterrizaje, y la audiencia de dicha campaña está correctamente parametrizada. Pese a esto, el desempeño de la campaña en línea no ha logrado trasladarse a la página de aterrizaje presentando esta una alta tasa de rebote (alcanzando el 85%) y una baja tasa de conversión (2,5%) definida como la cantidad de usuarios que presionan *Contáctanos*. Además, la cantidad de sesiones por usuario mostró ser insatisfactorias (1,09 sesiones/usuario) y la duración de la sesión tiene un promedio de 19 segundos.

Dado que la organización presenta un gran interés en disminuir la tasa de rebote y aumentar la tasa de conversión, se selecciona la misma para la validación del método. A su vez, se busca aumentar el tiempo de duración de la sesión y aumentar el promedio de sesiones por usuario mediante las mejoras sucesivas aplicadas por el método de mejora continua de GUIs. Durante la descripción de los resultados, se omiten deliberadamente los datos de la empresa a fin de preservar la identidad de la organización.

3.1 Fase de inducción

Se realiza en conjunto con un Informático y un Especialista en interfaz. Se recorre la página de aterrizaje en su totalidad y se identifica que ésta consiste en una página principal y cinco páginas secundarias. Se prioriza entonces la intervención sobre la página principal y se deja asiento en el acta de inducción. Los objetivos para la página de aterrizaje son:

- Brindar una mejor experiencia online, captando la atención de la audiencia y de los potenciales clientes. Su indicador asociado es una Tasa de rebote menor al 50% en los próximos 6 meses.
- Lograr captar nuevos clientes a partir del mejoramiento de la página de aterrizaje. Su indicador asociado fue que la tasa de conversión de la acción *contáctanos*, alcance un valor sostenido de 5% en los próximos 6 meses.
- Lograr que la información contenida en la página de aterrizaje sea una fuente de información útil para la audiencia argentina. Su indicador asociado fue, que las sesiones por usuario alcancen un valor sostenido de 1,2 promedio en la audiencia argentina en los próximos 6 meses, y que la duración de la sesión alcance un valor sostenido promedio de 30 segundos en los próximos 6 meses.

3.2 Fase de selección de elementos de intervención

Se seleccionan los elementos a intervenir e inicialmente se realizan actualizaciones al código fuente considerando lineamientos menores, actualizando el código fuente y cargándolo al repositorio de código. Así, se obtiene una guía de estilo base la cual se muestra en la Figura 2.

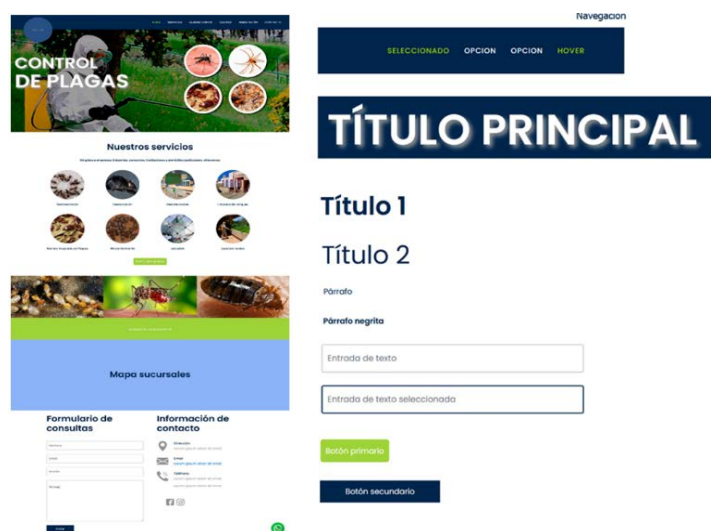


Figura 2. Guía de estilo. Página de aterrizaje original (izquierda) y representación visual de la guía de estilo (derecha)

Seguido, se consideran las alternativas de estilo que ameritan ser probadas en la página de aterrizaje por parte del Especialista en Interfaz. Posterior al análisis, se considerarán los siguientes estilos alternativos:

- **Tipografía:** Existen distintos elementos que cuentan con gran jerarquía (elemento h1). Estos, se muestran sintetizados con un gran impacto visual en los servicios provistos (Figura 2). En función de lo anterior, se proponen 4 alternativas de tipografía h1:
 1. h1 { font-family: 'Roboto', sans-serif; }
 2. h1 { font-family: 'Cabin', sans-serif; }

3. h1 { font-family: 'Archivo Black', sans-serif; }

4. h1 { font-family: 'Paytone One', sans-serif; }

- **Paleta de colores:** Se considera el color primario (#00254C) y secundario (#98CF04) de la página de aterrizaje (Figura 2). El Especialista en Interfaz propone 50 alternativas de paleta de colores, y se calculan las distancias HSL de cada paleta respecto de la original; se seleccionan las veinte paletas más adecuadas que participarían en las próximas actividades del método.

Se establecen, además, los grupos de permutación, donde el Especialista en Interfaz procede a identificar la composición estructural de la página de aterrizaje como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Composición estructural de la página de aterrizaje

Las restricciones visuales más prominentes en la página de aterrizaje identificadas por el Especialista en Interfaz son:

1. La opción de navegación N°1 (Home) debe ser siempre la primera opción, no pudiendo alternarse con otras opciones.
2. La sección N°1 (Carrusel con título principal) debe ser siempre la primera opción, no pudiendo alternarse con otras opciones.

Considerando estas restricciones y la jerarquía visual de los elementos, el Especialista en Interfaz decide conformar 4 grupos de permutación:

1. Grupo de permutación compuesto por las opciones de navegación, marcadas en Figura 3 como *opciones de navegación* (sin incluir la primera opción).
2. Grupo de permutación compuesto por las secciones principales de la página de aterrizaje, marcadas en la Figura 3 como *Sección 2, Sección 3, Sección 4 y Sección 5* (es decir, sin incluir la primera opción).
3. Grupo de permutación compuesto por los botones de servicio, marcados en la Figura 3 como *8 botones de servicio*.
4. Grupo de permutación compuesto por las columnas de contacto, marcadas en la Figura 3 como *columna de contacto 1 y columna de contacto 2*.

3.3 Fase de configuración

Las cuatro actividades correspondientes a esta fase son: 1) Evaluación de la arquitectura del método, 2) Obtención e integración de la herramienta de analítica web, 3) Vinculación de los Elementos de Intervención con su representación en código fuente, y 4) Parametrización.

En la actividad 1, el Informático revisa los criterios establecidos por el método y se decide utilizar la arquitectura online para la implementación del método de mejora continua de GUI. En la actividad II, se

determina que la información que debe ser obtenida de la página de aterrizaje es la tasa de rebote, tasa de conversión, sesiones por usuario y duración de la sesión, solo abarcando los dispositivos mediante los cuales se ingresó a la página que se encuentren localizados en Argentina. Se implementa entonces Google Analytics como herramienta de analítica web. Dado que el sistema implementa en secuencia varias páginas de aterrizaje, se incluye un identificador de seguimiento para cada una de estas.

Se realiza en la actividad 2 la inclusión de la herramienta analítica y se realiza una prueba de integración en un periodo de siete días, obteniéndose una tasa de rebote del 85%, tasa de conversión del 2,5%, sesiones por usuario 1,09, una duración de la sesión 19 segundos y una cantidad de 126 sesiones evaluadas. Con estos indicadores se considera que la prueba de integración fue exitosa. En la actividad 3, se rotulan los Elementos de Permutación que se enuncian en la fase de selección de Elementos de Intervención (Figura 3). Se realiza la rotulación del código fuente y la vinculación de los Elementos de Estilo. Y en la actividad 4, el Informático y el Especialista en Interfaz determinan los parámetros que se servirán como información de entrada para las herramientas del método. Se incluyen entonces:

- La cantidad de individuos por generación: se decide incorporar 10 individuos por generación usando la información de las métricas de la semana de prueba.
- Los criterios de aptitud: se asigna el 35% de importancia a la tasa de rebote, 30% a la tasa de conversión, 20% a las sesiones por usuario y 15% a la duración de la sesión.
- Duración de la generación: 2 semanas.
- Alcance de audiencia para nuevos y viejos individuos: se decide no eliminar a los individuos con divergencias que induzcan un bajo rendimiento, lo que se traduce en un alcance de audiencia del 80% para nuevos individuos y 20% para los viejos.
- Criterios de paro: se decide que fuesen un 50% de tasa de rebote, 5% de tasa de conversión, 1,2 sesiones por usuario y 30 segundos de duración de la sesión, que deben ser cumplidos en forma simultánea.

3.4 Fase de generación de la población inicial

Esta fase se compone de tres actividades que son: 1) Descripción e inclusión del cromosoma original, 2) Generación y registro de cromosomas, y 3) Filtro de aptitud no interactivo: descarte por bajo contraste.

En la actividad 2, el Informático describe la estructura perteneciente al cromosoma. Se decide la estructura que se muestra en la Tabla 1. Seguido, el Informático desarrolla e implementa micro servicios para crear y modificar estas estructuras.

Tabla 1. Estructura de un cromosoma

Nombre del dato	Tipo de dato
ID	INTEGER
grupo_perm_1_navbar	STRING[]
grupo_perm_2_secciones	STRING[]
grupo_perm_3_servicios	STRING[]
grupo_perm_4_contacto	STRING[]
color_principal_H	INTEGER
color_principal_S	INTEGER
color_principal_L	INTEGER
color_secundario_H	INTEGER
color_secundario_S	INTEGER
color_secundario_L	INTEGER
estilo_h1	STRING
Generación	INTEGER
cantidad_de_veces_solicitado	INTEGER
id_de_seguimiento_analitica	INTEGER
tasa_de_rebote	FLOAT
sesiones_por_usuario	FLOAT
duracion_sesion	FLOAT
tasa_de_conversion	FLOAT
puntaje_total	FLOAT

En la actividad 2, se generan los primeros cromosomas que formarían parte del método. Dicho proceso se basa en los grupos de permutación registrados, se eligen Elementos de Estilo de manera aleatoria y se obtiene el ID de seguimiento para cada uno de los cromosomas.

Finalmente, en la actividad 3, se desarrolla una función para descartar cromosomas cuya aptitud sea tan baja que comprometa la experiencia visual de la página de aterrizaje basadas en la diferencia de unidades de luminosidad entre integrantes de la paleta de colores (comparación de colores primarios y secundarios). De ese modo, se reemplaza a los cromosomas con conflicto visual de bajo contraste con nuevos integrantes generados de manera aleatoria y se recalcula la diferencia de luminosidad entre los colores para determinar su incorporación.

3.5 Fase de modificación de las GUIs

Esta fase se compone de dos actividades: 1) solicitud del cromosoma, y 2) Intervención del DOM. En la actividad 1, se construye una herramienta de lea y asigne las cookies del navegador de los usuarios a un cromosoma específico y se incluye en la página de aterrizaje un script que reemplaza el ID de seguimiento incluido en el código previamente por el ID de seguimiento indicado por el cromosoma obtenido.

En la actividad 2, se crea otro script para ser incluido dentro de la página de aterrizaje, cuyo objetivo es reflejar visualmente los cambios indicados en el cromosoma, modificando los Elementos de Intervención: Elementos de Permutación y Elementos de Estilo.

Finalmente, luego de generar el script de intervención del DOM e incluirlo en la página de aterrizaje, se procede con la medición de los tiempos de carga de esta. La aplicación del script no tiene una duración que comprometa la experiencia del usuario.

3.6 Fase de despliegue

En la fase de despliegue se realiza la actividad correspondiente con la arquitectura elegida para el método, denominada despliegue del script modificador de GUIs. Se agrega dicho script al código de la página de aterrizaje y posteriormente se la despliega. Se comprueba mediante intentos reiterados a la página, la asignación de un cromosoma a cada usuario y la implementación de las modificaciones esperadas.

3.7 Fase de medición

En esta fase se realizan cuatro actividades: 1) Obtención de resultados, 2) Alerta de bajo rendimiento, 3) Alerta de incumplimiento de hipótesis nula, y 4) Registro de resultados. En la actividad 1, se utilizan los recursos previamente configurados para confeccionar una herramienta que obtenga las métricas de desempeño por cada cromosoma solo considerando los usuarios en Argentina. En la actividad 2, no se incluye un umbral de bajo rendimiento para este caso, con lo cual, no fue realizada al igual que la actividad 3. Y finalmente, en la actividad 4, se realiza el registro de 14 días de cumplimiento de esta, obteniéndose los resultados de desempeño de la primera generación de cromosomas.

3.8 Fase de evaluación

En esta fase se realizan tres actividades: 1) Determinar y calcular la función aptitud, 2) Análisis del criterio de paro, y 3) Selección de individuos. En la actividad 1, se utiliza la función de aptitud propuesta por el método de mejora continua de GUIs (ecuación (1)).

$$F(X) = \frac{(A - R0a)}{(R1a - R0a)} * 100 * \alpha + \dots + \frac{(C - R0c)}{(R1c - R0c)} * 100 * \gamma \quad (1)$$

En esta se muestra el desempeño medido de la dimensión a (A), el límite de desempeño inferior y superior de la dimensión a ($R0a$ y $R1a$, respectivamente), y el coeficiente definido por el criterio de aptitud en la fase de configuración, actividad 4. A su vez, la dimensión a refiere a la duración de las sesiones, dimensión b a las sesiones por usuario, dimensión c a la tasa de conversión y dimensión d a la tasa de rebote. Para el límite

de inferior, se consideran las mediciones más bajas encontradas en la generación y para el límite superior, se tienen en cuenta los valores indicados en los objetivos de la página de aterrizaje (Tabla 2).

Tabla 2. Límites de desempeño inferior y superior

	Duración de la sesión	Sesiones por usuario	Tasa de conversión	Tasa de rebote
Límite de desempeño inferior	9,928	1	0	0,958
Límite de desempeño superior	30	1,2	0,05	0,5

Por lo anterior, la función aptitud resultante está detallada en la ecuación (2).

$$F(X) = \frac{(A - 9.928)}{(30 - 9.928)} * 100 * 0.15 + \frac{(B - 1)}{(1.2 - 1)} * 100 * 0.2 + \frac{(C)}{(0.05)} * 100 * 0.3 + \frac{(D - 0.958)}{(0.5 - 0.958)} * 100 * 0.35 \quad (2)$$

En la actividad 2, se determina que el desempeño promedio de las GUIs no cumple con los criterios de paro establecidos en la Fase de Configuración. El mismo muestra estar lejos de lo esperado por lo que se decide avanzar con las fases siguientes. En la actividad 3, se opta para la selección de los individuos por el método de selección por *ranking*. Para esto, se trabaja con la herramienta *Creador de cromosomas* de manera que se ordene a la población con base en su función aptitud y les asigne una cantidad de copias; por consiguiente, los 3 cromosomas con la peor performance desaparecen, mientras, aquellos 3 con mejor función de aptitud, se duplica su cantidad de copias, manteniendo en 10 siempre la cantidad de cromosomas por generación. Se continua luego con la siguiente fase.

3.9 Fase de cruzamiento y mutación

En esta fase se realizan tres actividades: 1) Cruzamiento, 2) Mutación e, 3) Inclusión de la hipótesis nula. En la actividad 1, el Informático trabaja sobre la herramienta *Creador de cromosomas* para generar los cromosomas nuevos, sin embargo, como fue previamente definido, es pertinente que un 20% de los cromosomas deben ser expuestos de forma prolongada, utilizándose aquellos con mejor desempeño. De éstos, una copia pasa a la siguiente generación sin cambio alguno, mientras la otra se usa el cruzamiento. La herramienta agrupa las copias restantes de manera aleatoria y realiza el cruce de estas, generando una cantidad de cromosomas equivalente a la cantidad de copias, es decir, 10.

Por otro lado, la herramienta *Creador de cromosomas* utiliza el operador de cruzamiento binomial aleatorio para la generación de nuevos cromosomas, creando un cromosoma con las características compartidas de ambos padres, como así también un segundo cromosoma que es complemento del primero. Luego del cruzamiento, se avanza en la actividad 2, utilizando la herramienta *Creador de cromosomas* para que la misma pueda aplicar la mutación sobre la nueva generación.

Los cromosomas elegidos para la mutación sufren entonces una modificación en uno de sus genes elegidos de manera aleatoria, reemplazando el valor de este de acuerdo con los criterios indicados en la fase de generación de la población inicial, actividad 2 (generación y registro de cromosomas) también usada para la creación de la generación inicial. El método propuesto indicia incluir la hipótesis nula en las generaciones cuyo número es múltiplo de tres, por lo que la actividad 3 no se realiza en la segunda.

Posterior a estos procesos, se analizan los resultados de las generaciones subsecuentes, creadas a partir de cada iteración del método. Así, el método continúa de manera automática con la herramienta *Modificador de GUI*, y la información es distribuida de la misma forma que en la primera generación y su desempeño es medido a lo largo de 14 días desde la creación de la segunda generación. En esta segunda generación (cromosomas 11 a 20), el promedio de desempeño no es suficiente para cumplir el criterio de paro y posteriormente, se calcula la función aptitud. Luego, los cromosomas son seleccionados para ser copiados en la próxima generación o cruzados con otros cromosomas según los criterios descritos.

Se crea entonces la tercera generación con diez nuevos cromosomas (cromosomas 21 a 30) y el proceso se repite. Los resultados del desempeño muestran que el promedio no es suficiente para cumplir el criterio de paro. Además, al deberse ejecutar la hipótesis nula cada tres generaciones, se duplica un cromosoma

elegido aleatoriamente, reemplazando a otro de los cromosomas de la generación. Para estos dos cromosomas idénticos se hallan métricas similares en ambos casos, teniendo un mismo número de sesiones por usuario, tasa de conversión y tasa de rebote, variando solo levemente el promedio de duración de las sesiones (36,21 vs 35,57). Con ello, se valida la hipótesis nula y las mediciones del experimento. Se calcula la función aptitud y se selecciona los cromosomas para ser copiados en la próxima generados o cruzados. Con ello, se crea la cuarta generación de cromosomas.

En la cuarta generación (cromosomas 31 a 40), nuevamente se repite el proceso, pero no se cumple el criterio de inclusión de la hipótesis nula al no ser múltiplo de tres. En esta generación los resultados de desempeño se acercaron a los objetivos planteados inicialmente, aunque aún, sin ser suficiente para el cumplimiento del criterio de paro. Se calcula la función aptitud y se seleccionan los cromosomas para ser copiados cruzados o descartados para crear la quinta generación.

En la quinta generación (cromosomas 41 a 50) se encuentra que el desempeño es suficiente para cumplir el criterio de paro. Aunque posterior a esto debe continuarse con la fase de cierre, se decide continuar con dos generaciones más (sexta y séptima) adicionales para profundizar el análisis del método. En la sexta generación (cromosomas 51 a 60) se crean los diez nuevos cromosomas producto de la copia, cruzamiento y mutación de los integrantes de la generación anterior. Además, se cumple el criterio de inclusión de la hipótesis nula al ser múltiplo de tres, por lo que se duplica un cromosoma elegido aleatoriamente y se reemplaza el lugar de otro de los cromosomas de la generación. Se encuentra que ambos cromosomas tuvieron la misma cantidad de sesiones por usuario, tasa de conversión y tasa de rebote, variando levemente la duración de las sesiones (30,14 vs 30,29).

Con la séptima generación, se busca evaluar el desempeño del cromosoma más exitoso de la generación más exitosa. Para esto se selecciona el cromosoma 41 (quinta generación), y se crean diez cromosomas adicionales que poseen las características exactas del cromosoma 41, midiéndose su desempeño, lo cual será abordado posteriormente.

3.10 Fase de cierre

Posterior a la generación y análisis a lo largo de las siete generaciones, se realizan las actividades de cierre por parte del responsable de marketing, el Informático y el Especialista en Interfaz. Se presenta la página de aterrizaje con los cambios introducidos por las herramientas que integran el método y se presenta el impacto de este sobre el desempeño de la página de aterrizaje. La versión final de la página se muestra en la Figura 4 y la versión inicial, en la Figura 2. Se procede a revisar los cambios aportados por el cromosoma 41, y se edita el código fuente de la página de aterrizaje para que coincidiera con dichos cambios.

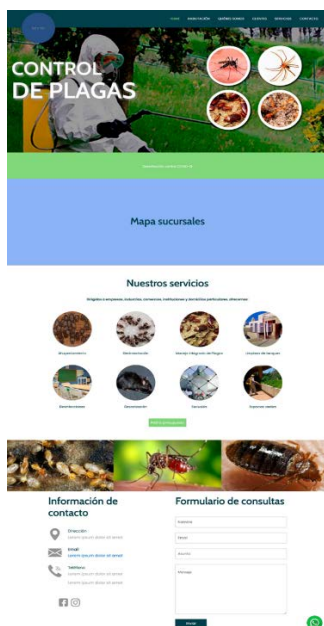


Figura 4. Página de aterrizaje final (Cromosoma 41)

Luego, la página de aterrizaje es desplegada y todos los servicios provistos por la herramienta del método son pausados. El código fuente de estas herramientas se almacena en un repositorio de código en caso de que el método sea implementado en un futuro, y toda la información de las bases de datos de cromosomas es almacenada en un documento. Este almacenamiento queda asentado en el acta de cierre.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En un lapso de cinco meses y medio se realiza la implementación del método de mejora continua de GUIs para que la página de aterrizaje pertinente a una empresa de Fumigación y Control de Plagas lograra los objetivos para los cuales fue diseñada. Al final de la implementación y evaluación de la quinta generación del método, la página logra alcanzar dichos objetivos (tasa de rebote, tasa de conversión, sesiones por usuario y duración de la sesión) y mantiene buen desempeño de manera sostenida hasta la actualidad. El desempeño de las sesenta GUIs a lo largo de las siete generaciones se observa en la Figura 5.

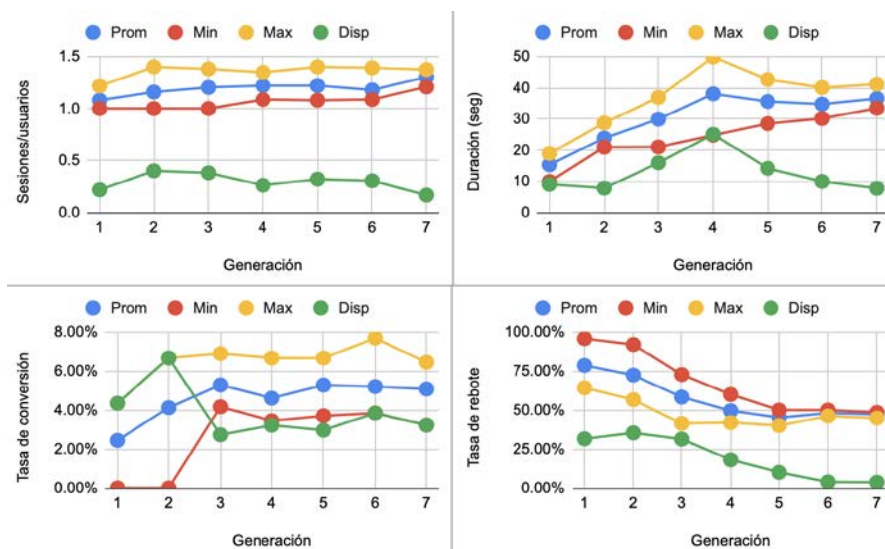


Figura 5. Desempeño de las GUIs en siete generaciones

En síntesis, al comparar la GUI inicial con la versión final, se pueden mencionar las siguientes mejoras:

- Sesiones por usuario: pasó de 1,09 a 1,3.
- Duración promedio de la sesión: pasó de 19 segundos a 36 segundos.
- Tasa de conversión: pasó de 2,5% a 5%.
- Tasa de rebote: pasó de 85% a 48,5%.

Sumado a esto, el presente método propone someter a algunas generaciones a la inclusión de la hipótesis nula (también denominada test de nulidad o test A/A). La misma es incluida en las generaciones 3 y 6, demostrando que un cromosoma que es expuesto a dos audiencias separadas en un mismo período de tiempo obtiene un desempeño similar, sustentando la consistencia del método y el vínculo entre el desempeño y el cromosoma. Esta consistencia se ve reflejada en la séptima generación, donde, al participar únicamente el cromosoma 41, la diferencia de puntaje de función aptitud máxima y mínima se redujo un 48% (de 50 puntos de diferencia a 26 puntos de diferencia).

Luego del análisis de las imágenes correspondientes a las sesenta GUIs generadas, se puede observar que existen ciertas características que fueron poblando paulatinamente a las generaciones, facilitando su convergencia. Una de ellas es la predisposición de los usuarios por las tipografías delgadas y las combinaciones de color con alto contraste, priorizando las tonalidades azules y verdes.

Existen otras características que han sido exploradas, más no han parecido generar un impacto consistente en las páginas de aterrizaje, ya sea de manera positiva o negativa. Una de ellas es la sección de contacto, que en ocasiones ha aparecido al fondo de la página de aterrizaje, ya que es su ubicación original y es considerada como una ubicación convencional de acuerdo con la narrativa de las plataformas. Sin embargo,

en algunas generaciones han sido ubicadas en posiciones superiores teniendo resultados similares a los de sus contrapartes.

Algo similar sucede con la permutación de hipervínculos en la barra de navegación, aunque se ha encontrado que la mayoría de las páginas de aterrizaje en las generaciones posteriores poseen el hipervínculo de *Habilitación* cercano al hipervínculo principal. La empresa de Fumigación y Control de Plagas reporta que una gran porción de las consultas recibidas a través de la opción de contacto en la página de aterrizaje es relacionada a la habilitación de locales y comercios.

Finalmente, la característica más notable de la evolución de las GUIs es evidente a simple vista, y se basa en la posición del botón de consultas respecto a los servicios de desinfección de COVID-19 (Figura 4) en la página aterrizaje, a la derecha, caracterizado como una barra verde debajo de la imagen principal. Se observa que las páginas de aterrizaje que muestran este botón en pantalla sin necesidad de desplazarse verticalmente (o con un mínimo desplazamiento vertical, dependiendo de la resolución de pantalla) presentaban mejores indicadores de manera consistente.

5. CONCLUSIONES

Se determina que el método de mejora continua de GUIs puede ser aplicado con resultados positivos, ayudando a estas a alcanzar los objetivos para los que fueron diseñadas. De esta manera, Informáticos y Especialistas en Interfaz involucrados en el diseño, desarrollo e implementación de GUIs de plataforma web pueden contar con un método semi-automático, que, utilizando AGIs y la retroalimentación proveniente de usuarios finales, establezca la mejora continua en aplicaciones web para asegurar bajos costos en su desarrollo y puesta en producción, mientras que maximiza los objetivos de las GUIs.

A partir de lo anterior, se deben realizar validaciones del método en otros contextos de análisis, de modo que se puedan identificar reglas en común a una gran cantidad de casos que rigen la mejora del desempeño de las GUIs a través de sus generaciones. Ejemplo de esto podría ser: Cantidad de generaciones respecto a incremento relativo de desempeño, impacto de la exploración en el desempeño, mínima cantidad de generaciones para mejoras, nivel de convergencia en cada generación, impacto en el progreso del método de acuerdo con distintas técnicas de selección, mutación, cruzamiento y parametrización del método.

Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados de desempeño de la aplicación del método en la página de aterrizaje de la empresa descrita, podría evaluarse la aplicación de manera metódica de algoritmos de Inteligencia Artificial para obtener hipótesis que relacionen la presencia o ausencia de características con las mejoras en las dimensiones de desempeño de las GUIs.

Asimismo, podría agregarse complejidad al cromosoma, agregando Elementos de Intervención distintos a los grupos de permutación o Elementos de Estilo (por ejemplo, considerando funcionalidades enteras de una plataforma web como elemento de intervención), o profundizar los valores posibles en los Elementos de Estilo ya existentes, permitiendo que los mismos tengan más libertad de modificación.

Finalmente podría analizarse la ramificación de los AGIs de acuerdo con las preferencias de un segmento de audiencia identificado, permitiendo enfocarse en sectores determinados, por ejemplo, según región geográfica o el tipo de dispositivo usado. Con ello se propone identificar distintos grupos de audiencia basados en su interacción con la GUI, para luego implementar métodos de mejora continua tan diversos, como los grupos de audiencia que hayan sido identificados.

REFERENCIAS

- [1] S. Miller y S. Huber. *A Bíblia e Sua História: O Surgimento e o Impacto da Bíblia*. Rio de Janeiro: Sociedade Bíblica do Brasil, 2017.
- [2] J. E. Passos, T. L. Silva, "La Evolución Tecnológica y su Impacto en el Diseño de la Interfaz: Diplomado en Diseño de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul". 2013. Recuperado: <http://www.bocc.ubi.pt/pag/passos-silva-2013-la-evolucion-tecnologica-impacto.pdf>

- [3] L. Santaella. *Navegar no ciberespaço: O perfil cognitivo do leitor imersivo*. São Paulo: Paulus, 2004.
- [4] M. C. Albornoz, M. Berón y G. Montejano, "Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño" en *XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, pp. 570-574, 2017.
- [5] D. Ramírez, J. Cervantes, J. Molina and S. López, "Requirements Engineering to Design a Brain-Computer Interface for Cognitive Training", in *2018 7th International Conference On Software Process Improvement*, pp. 79-84, 2018.
- [6] M. Moshagen and M. Tielsch, "Facets of visual aesthetics", *Int. J. Human-Comp. Studies*, vol. 68, pp. 689-709, 2010.
- [7] L. Sbaffi and J. Rowley, "Trust and credibility in web-based health information: a review and agenda for future research", *Journal of medical Internet research*, vol. 19, no. 6, 2017.
- [8] E. B. Ponte, E. Carvajal-Trujillo and T. Escobar-Rodriguez, "Influence of trust and perceived value on the intention to purchase travel online: Integrating the effects of assurance on trust antecedents", *Tourism Management*, vol. 47, pp. 286-302, 2015.
- [9] B. Hasan, "Perceived irritation in online shopping: The impact of website design characteristics", *Computers in Human Behavior*, vol. 54, pp. 224-230, 2016.
- [10] M. T. Tielsch, I. Blotenberg and R. Jaron, "User evaluation of websites: From first impression to recommendation", *Interacting with Computers*, vol. 26, no. 1, pp. 89-102, 2014.
- [11] Watermark Consulting, "The Watermark Consulting 2013 Customer Experience ROI Study". 2013. Recuperado: <https://www.watermarkconsult.net/blog/2019/01/14/customer-experience-roi-study/>
- [12] W. Sánchez, "La usabilidad en Ingeniería de Software: Definición y características", *Ing-novación*, vol. 1, no. 2, pp. 7-21, 2011.
- [13] P. Pina, "What's perfect for me? How CPG shoppers are making the best choice". 2018. Recuperado: <https://www.thinkwithgoogle.com/consumer-insights/consumer-packaged-goods-industry/>
- [14] A. Lee, "The Future of Design in Start-Ups Survey: 2016 Results". 2016. [Online]. Available: <https://www.nea.com/blog/the-future-of-design-in-start-ups-survey-2016-results>
- [15] R. Kohavi and R. Longbotham, "Online Controlled Experiments and A/B Testing", *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*, vol. 7, no. 8, pp. 922-929, 2017.
- [16] R. Kohavi, T. Crook, and R. Longbotham, "Online experimentation at Microsoft". 2009. [Online]. Available: <https://exp-platform.com/experiments-at-microsoft/>
- [17] A. Agung Zulkarnaen, "Pengembangan Web Landing Page CMS Wordpress Dengan Plugin Thrive Architect Pada Acara Entreprenuer Gathering 5", Technical Report. studentstaff5, Perpustakaan Institut Teknologi Telkom Purwokerto (Unpublished), 2018.
- [18] R. Gafni and N. Dvir, "How content volume on landing pages influences consumer behavior: empirical evidence", in *Proceedings of the Informing Science and Information Technology Education Conference*, La Verne, California, pp. 035-053, 2018.
- [19] A. Forsythe, M. Nadal, N. Sheehy, C. J. Cela-Conde and M. Sawey, "Predicting beauty: fractal dimension and visual complexity in art", *British journal of psychology*, vol. 102, no. 1, pp. 49-70, 2011.
- [20] E. Michailidou, S. Harper and S. Bechhofer, "Visual complexity and aesthetic perception of web pages", in *Proceedings of the 26th annual ACM international conference on Design of communication*, pp 215-224, 2008.
- [21] A. Bringas Hidalgo. Psicología. Mexico: Esfinge, 2010.
- [22] M. Seckler, K. Opwis and A. N. Tuch, "Linking objective design factors with subjective aesthetics: An experimental study on how structure and color of websites affect the facets of users' visual aesthetic perception", *Computers in Human Behavior*, vol. 49, pp. 375-389, 2015.
- [23] M. Moshagen and M. Tielsch, "Facets of visual aesthetics", *Int. J. Human-Comp. Stud.*, vol. 68, pp. 689-709, 2010.
- [24] D. Cyr, M. Head and H. Larios, "Colour appeal in website design within and across cultures: A multi-method evaluation", *International journal of human-computer studies*, vol. 68, no. (1-2), pp. 1-21, 2010.
- [25] D. Cyr and M. Head, "Website design in an international context: The role of gender in masculine versus feminine oriented countries", *Computers in Human Behavior*, vol. 29, no. 4, pp. 1358-1367, 2013.
- [26] M. Sharples, "Human-computer interaction", in *Artificial Intelligence*, M. Boden, Oxford: Oxford University press, pp. 293-323. 1996.
- [27] J. Kolko, "Design thinking comes of age". 2015. Recuperado: https://cdn.fedweb.org/fed-42/2892/design_thinking_comes_of_age.pdf
- [28] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Genetic algorithms: A survey", *Computer*, vol. 27, no. 6, pp. 17-26, 1994.
- [29] S. Mirjalili. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Cham: Springer International Publishing AG, 2019.
- [30] S. B. Cho, "Towards creative evolutionary systems with interactive genetic algorithm", *Applied Intelligence*, vol. 16, no. 2, pp. 129-138, 2002.
- [31] R. Miikkulainen, N. Iscoe, A. Shagrin, R. Cordell, S. Nazari, C. Schoolland and G. Lamba, "Conversion rate optimization through evolutionary computation" in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 1193-1199, 2017.
- [32] B. S. Blanchard. *Ingeniería de sistemas*. Madrid: Isdefe, 1995.
- [33] I. Sommerville. *Ingeniería del software*. Madrid: Pearson educación, 2005.
- [34] L. A. Macaulay. *Requirements engineering*. London: Springer Science y Business Media, 2012.

Utilización de IoT en el diagnóstico temprano del Covid-19

Juan David Corso Medina¹
Leonardo Juan Ramírez López²
Universidad Militar Nueva Granada
Colombia

En este capítulo se describe el proceso y los resultados obtenidos del desarrollo del proyecto *Utilización de IoT en el diagnóstico temprano del Covid-19*, en el cual se desarrolló e implementó un prototipo que realiza las mediciones de las variables fisiológicas del usuario, tales como la saturación de oxígeno, la frecuencia cardiaca, la temperatura corporal y frecuencia respiratoria, con el objetivo de identificar cambios relevantes que pudiesen servir como indicios de un posible caso de contagio por Covid-19. Para identificar algún cambio importante en las variables fisiológicas medidas se realizaron cruces de las mismas, para identificar patrones que sirvieran como indicador de un posible caso de contagio. Para la implementación del prototipo se utilizaron diferentes tecnologías y sensores para la recolección de los datos necesarios; adicionalmente, se utilizaron servicios en la nube de AWS para el almacenamiento de los datos y el despliegue de la página web, donde se visualiza el cuadro de mando con los variables fisiológicas y las gráficas con el cruce de las mismas, además de las alertas implementadas. Para la obtención de los datos y la puesta en marcha del prototipo se realizó una serie de pruebas a nivel de laboratorio, con las cuales se corroboró el correcto funcionamiento del prototipo y de la información suministrada en el cuadro de mando. Para la información suministrada en las alertas se identificó el funcionamiento de las mismas cuando se presentaban cambios relevantes en los datos obtenidos, determinando así que es posible la aplicación de sistemas de internet de las cosas para la detección de Covid-19

¹ Contacto: est.juan.corso@unimilitar.edu.co

² Contacto: leonardo.ramirez@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La crisis que se ha generado por la pandemia del Covid-19 ha afectado económica y socialmente a la población mundial, los sistemas de salud de los distintos países se han puesto a prueba a causa de la cantidad de contagios y muertes que ha dejado el virus a nivel mundial, contando con más de ciento cincuenta y siete millones de contagios en el mundo [1].

La principal fuente de contagio según la organización mundial de la salud, se produce por el contacto físico entre las personas, ya que una persona contagiada puede expulsar saliva o partículas que transportan el virus, siendo inhalada por las demás personas, produciéndose el contagio y la transmisión del virus, siendo los ojos la nariz y la boca los canales por los cuales se puede infectar una persona, teniendo en cuenta el tiempo prolongado de incubación del virus, antes de presentar algún síntoma relevante, la propagación es muy efectiva [2].

Teniendo en cuenta la facilidad con la que se realiza la propagación del virus es importante encontrar mecanismos que permitan la detección temprana de un contagio de Covid-19, con el objetivo de tomar las medidas necesarias que faciliten la contención y disminuyan la propagación del virus entre la población.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Coronavirus

Los coronavirus son un grupo amplio de virus que causan diversos síntomas y enfermedades respiratorias como el resfriado o síntomas más graves que pueden causar la muerte. Los coronavirus se pueden contagiar de los animales a las personas, siendo así la transmisión zoonótica, incluidos los camellos, pangolines y murciélagos [3].

Los coronavirus fueron identificados por primera vez en la década de 1960, en personas con resfriados comunes, el nombre de este tipo de virus proviene de su forma característica con protuberancias en forma de corona en la superficie de los virus, como se ve en la Figura 1.

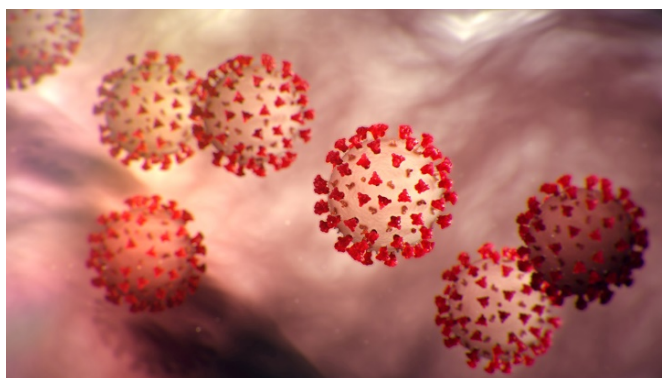


Figura 1. Coronavirus [4]

Las infecciones que son producidas por algunos tipos de coronavirus se presentan en mayor frecuencia durante las temporadas de invierno, así mismo los anticuerpos pueden durar en una media de cuatro meses en promedio [5]. En la actualidad se conocen siete tipos de coronavirus que pueden infectar a los humanos, cuatro de ellos generan resfriados comunes y se estima que gran parte de la población ha desarrollado mecanismos de defensa lo que indica un alto número de inmunización. Sin embargo, los coronavirus restantes pueden afectar en mayor medida la salud de las personas, estos son el SARS-COV, MERS-COV y SARS-COV-2 [6].

El SARS-COV, es un coronavirus que fue identificado por primera vez en el sur de China en el año 2002, el cual infectó a más de 8400 personas en 26 países de Asia. El MERS-COV, fue identificado en el Oriente Medio, identificado en el año 2017 y afectando a 27 países con menos de 2500 infectados.

El SARS-COV-2, se detectó por primera vez en la ciudad de Wuhan China en el año 2019, teniendo una facilidad para la propagación a causas de su largo tiempo de incubación antes de presentar los síntomas relacionados el cual es de 14 días aproximadamente [6].

2.1.1 SARS-COV2

El nuevo coronavirus identificado SARS-COV-2, es causante de la enfermedad COVID-19, el cual cuenta con una similitud genética y estructural del 80% con el coronavirus SARS-COV, teniendo un origen de transmisión zoonótica proveniente del pangolín y de los murciélagos. El virus sars-cov-2 cuenta con cuatro proteínas estructurales, identificadas como proteína S, que tiene como propósito la adhesión a las células receptoras para iniciar el proceso de infección en las personas, la proteína E, la cual es la proteína que envuelve el RNA, la proteína M, la cual es la membrana y el RNA viral.

En cuanto a los aspectos clínicos, las personas que son infectadas por el virus SARS-COV-2, presentan una variedad de síntomas que pueden ser leves, moderados o en algunos casos pueden presentarse síntomas graves, los cuales pueden incluir neumonías, o cuadros de respiración aguda. Sin embargo, los síntomas más comunes que se pueden presentar en la mayoría de la población son temperatura corporal alta, superando los 37.5°, también se presenta tos, dificultad para respirar, malestar general vómito y congestión nasal, en algunos casos se puede presentar pérdida del olfato y del gusto. Los pacientes también pueden presentar otro tipo de síntomas como los siguientes:

- Neurológicos: mareos, alteración del nivel de conciencia, algunos síntomas que afectan en promedio al 3% de los pacientes son los accidentes cardiovasculares, epilepsia y neurología.
- Cardiológicos: La Covid puede presentar en pacientes síntomas relacionados con el fallo cardiaco o el daño del miocardio agudo, en algunos casos donde no se presentó síntomas de fiebre o síntomas respiratorios.
- Oftalmológicos: Se pueden presentar ojos secos, visión borrosa, este tipo de síntomas se presentan en un 10% de los pacientes.

Las personas de edad avanzada son más propensas a presentar síntomas más graves, siendo los más afectados por la enfermedad COVID-19 [7].

2.1.2 Propagación del virus

El medio de transmisión de SARS-COV-2, se produce cuando una persona que se encuentra infectada exhala saliva y partículas producidas en el sistema respiratorio que contienen el virus, las cuales son inhaladas por las demás personas o pueden entrar en contacto con los ojos o la boca, produciéndose así la infección. En algunas circunstancias se puede presentar el contagio por el contacto de las manos con los ojos nariz o boca. Es por ello que los mecanismos de protección indican un lavado constante de manos, mantener un distanciamiento social de al menos un metro y medio, además del uso de tapabocas y elementos de protección visual como caretas [8].

2.2 Variables fisiológicas

Las variables fisiológicas son las mediciones de las funciones más básicas del cuerpo para tener información del estado de salud general, las variables fisiológicas son:

2.2.1 Temperatura corporal

La temperatura corporal del cuerpo pueda variar por distintos factores entre los cuales están la actividad física, el consumo de alimentos y líquidos entre otras, la temperatura corporal de una persona sana puede oscilar entre los 36.5° C y los 37,5° C, si este valor de la temperatura corporal se ve aumentado indica la presencia de fiebre, la cual está regulada por el hipotálamo, como se puede visualizar en la Figura 2, que se encuentra en la parte interna del encéfalo, cuya función principal es la de regular la temperatura del cuerpo, con base a las señales registradas por los receptores y la temperatura de la sangre.

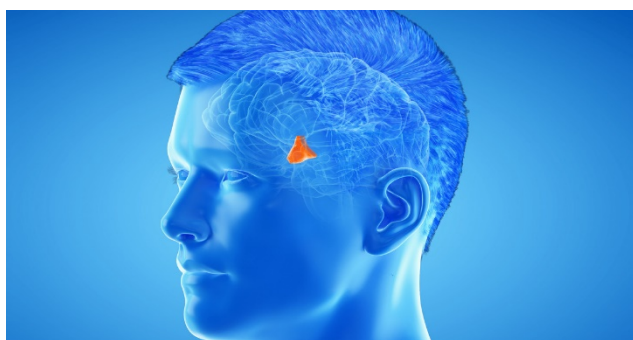


Figura 2. Hipotálamo [9]

La temperatura corporal normal varía según la edad de las personas en la Tabla 1, se evidencian los valores normales de la temperatura corporal.

Tabla 1. Valores normales temperatura corporal [10]

Edad	Temperatura [°C]
0 a 2 años	34.7 °C - 37.3°C
3 a 10 años	35.9 °C - 36.7°C
11 a 65 años	35.2 °C - 37.3°C
Más de 65 años	35.6 °C - 37.3°C

2.2.2 Frecuencia respiratoria

La frecuencia respiratoria el cual indica la cantidad de respiraciones que realiza una persona en un minuto, esta variable fisiológica varía según la actividad física realizada. Este parámetro hace parte del sistema respiratorio, cuya función principal es la respiración la cual comprende dos fases, la inspiración que permite que el aire fluya a los pulmones y la expiración en la cual se expulsan los gases de los pulmones, esto a cargo de los músculos intercostales 8 y el diafragma, otra función es el intercambio de gases, obteniendo oxígeno a partir del ambiente externo para proporcionarlo a las células del cuerpo y la eliminación del organismo del dióxido de carbono que se produce en el metabolismo celular [11].

El sistema respiratorio está formado por las vías aéreas superiores e inferiores, la nariz, que filtra el aire inspirado por medio de las fosas nasales y elevando su temperatura hasta alrededor de los 25 °C, la laringe, donde están ubicadas las cuerdas vocales, que permiten generar los sonidos y la voz, la tráquea, es un tubo de alrededor de 12 cm de longitud que ayuda a expulsar el polvo haya podido pasar hacia la faringe, los bronquios, bronquiolos y alveolos, producen el intercambio de oxígeno y finalmente los pulmones [11].

En la Tabla 2 se muestra los valores normales de la frecuencia respiratoria en estado de reposo según la edad.

Tabla 2. Valores normales de frecuencia respiratoria

Edad	Ventilaciones x minuto
Nacido (6 sem)	40-45
1 - 2 años	20 - 35
2 - 6 años	20 - 30
6 - 10 años	12 - 20
10 años y más	12 - 20

2.2.3 Saturación de oxígeno

La medición de la variable fisiológica de la saturación de oxígeno o también conocida como porcentaje de oxígeno en sangre es muy importante para conocer el estado de salud de las personas, siendo en promedio del 95%, sin embargo, se pueden presentar variaciones según la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentre la persona, cuando los valores de la saturación de oxígeno disminuyen por debajo del 95%, el cuerpo entra en estado de hipoxemia, el cual genera dificultades para respirar, dolor de cabeza y confusión [12]. A continuación, en la Tabla 3 se muestra con los valores mínimos según la altura sobre el nivel del mar.

Tabla 3. Valores mínimos de saturación de oxígeno

Altitud sobre el nivel del mar	SO2
970	95.8
1520	95.5
1728	95.7
1923	95.1
2180	95.2

2.2.4 Frecuencia cardiaca

La variable fisiológica de la frecuencia cardiaca indica la cantidad de veces que el corazón late por minuto, este valor se puede ver afectado por diferentes situaciones como la actividad física o las emociones de las personas o la edad [13]. A continuación, se muestran los valores normales de la frecuencia cardiaca en personas en estado de reposo, como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores normales FC [14]

Edad	FC normal (PPM)
Hasta 1 mes	70 a 190
De 1 a 11 meses	80 a 160
De 1 a 2 años	80 a 130
De 3 a 4 años	80 a 120
De 5 a 6 años	75 a 115
De 7 a 9 años	70 a 110
Más de 10 años	60 a 100

3. MÉTODO

En el desarrollo de trabajo se definieron las metodologías de la investigación para dar cumplimiento a los objetivos establecidos, donde se dividió en tres fases. En la primera fase se implementó una metodología exploratoria donde se realizó una investigación teórica para dar el fundamento a la implementación, en la segunda fase se implementó una metodología descriptiva documental y finalmente para la realización del prototipo para la detección temprana del Covid-19 se realizó una metodología descriptiva.

4. DESARROLLO

4.1 Sensores

Para el desarrollo del prototipo que busca realizar la detección temprana del Covid-19, se realizó la búsqueda de algunos sensores que permitieran la medición de las diferentes variables fisiológicas como la temperatura corporal, la frecuencia cardiaca, la frecuencia respiratoria y la saturación de oxígeno, para obtener información relevante y realizar un diagnóstico que permita la disminución de la propagación del virus al tener conocimiento del estado de salud. En la Tabla 5, se evidencian los diferentes sensores que fueron utilizados en el desarrollo del prototipo.

Tabla 5. Variables fisiológicas y sensores de medición

Variable	Ref. sensores
Temperatura	DS18B20
Frecuencia respiratoria	KY-370
Frecuencia cardiaca	MAX-30100
Saturación de oxígeno	MAX-30100

En cuanto a la elección de los sensores para la medición de la temperatura corporal se optó por utilizar el sensor digital ds18b28, el cual proporciona lecturas de 9 a 12 bits, este sensor cuenta con tres pines los cuales son Vdd, GND y DATA, como se muestra en la Figura 3. Para la medición de la frecuencia respiratoria se implementó el sensor KY-037, como se muestra en la Figura 4, el cual es un sensor de sonido con el que se cuentan la cantidad de exhalaciones por minuto que realiza una persona, implementándolo cerca de las fosas nasales de la persona, al ser un sensor de sonido es de gran importancia mantenerse en un lugar silencioso sin interferencias de ruidos que puedan afectar la medición.



Figura 3. Sensor de temperatura [15]



Figura 4. Sensor KY-037 [16]

Para la medición de la frecuencia cardiaca y la saturación de oxígeno se utilizó el sensor Max-30100 ya que al permitir la medición de estas dos variables fisiológicas en un solo sensor reduce el tamaño y la cantidad de sensores implementados, el sensor MAX-30100 es un sensor que combina dos leds, uno de ellos fotorreceptor y un optimizador óptico, este sensor opera desde los 1,8 V a los 3,3 V, como se puede ver en la Figura 5.



Figura 5. Sensor MAX-30100 [17]

4.2 Requerimientos técnicos

Para la implementación del prototipo se plantearon algunos requerimientos para el desarrollo. Se definió que el prototipo debe contar con redundancia en los sensores implementados es decir que cada variable fisiológica debe ser medida con dos sensores, para dar mayor certeza en los valores obtenidos. Para el análisis de los datos se definió la implementación de una paina web donde se visualizará el cuadro de mandos con los datos de las variables fisiológicas y así mismo la implementación de las alertas necesarias para mantener informado a la persona de su estado de salud.

4.3 Arquitectura a implementar

La arquitectura diseñada para la implementación del dispositivo para la detección temprana del Covid-19 se evidencia en Figura 6, donde se evidencian los sensores que serán conectados a los microcontroladores para adquisición de los datos de las distintas variables fisiológicas, para luego ser almacenadas en una base de datos para su posterior búsqueda y análisis por medio de un cuadro de mandos donde el usuario podrá conocer su estado de salud y de un posible caso de contagio por Covid-19.

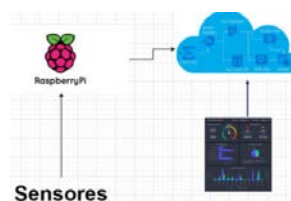


Figura 6. Arquitectura IoT para la detección del Covid-19

4.4 Conexión de sensores

Con la elección de los sensores realizados se procedió a realizar la conexión correspondiente para la adquisición de los datos necesarios, en la Figura 7 se muestra las conexiones realizadas con la Raspberry Pi y el Arduino Uno. La conexión de los sensores de temperatura se realizó en la Raspberry Pi. En la figura 8, se muestra la conexión de los sensores KY-037.

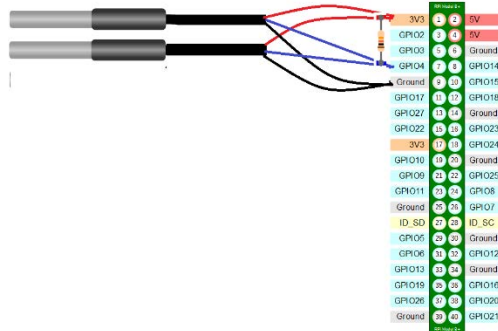


Figura 7. Conexión sensores de temperatura

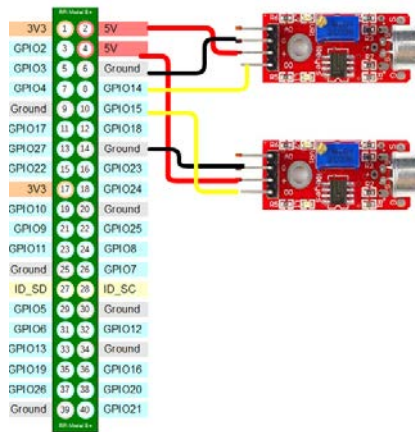


Figura 8. Conexión de los sensores KY-037

La conexión de los sensores Max 30-100 se realizó uno en la Raspberry Pi y el otro se realizó en el Arduino uno como se muestra en las Figura 9 y 10.

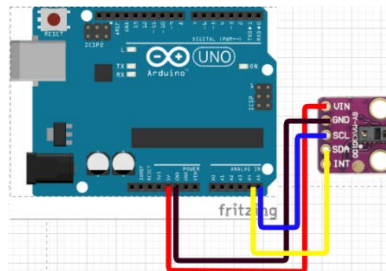


Figura 9. Conexión sensor Max-30100 en Arduino-uno

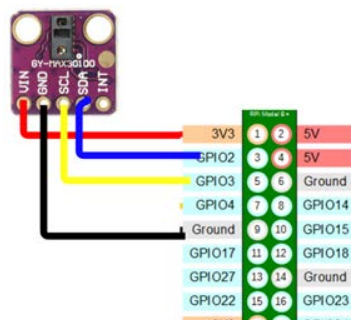


Figura 10. Conexión Max30-100 en Raspberry PI

En la conexión realizada para la integración del Arduino y la Raspberry Pi, se realizó por medio de un cable USB donde la comunicación entre los dos dispositivos se realiza por medio de comunicación serial, como se muestra en la Figura 11.

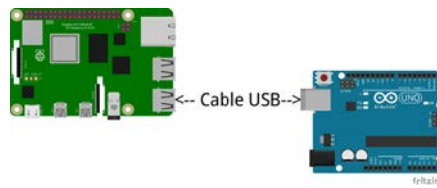


Figura 11. Conexión Raspberry Pi y Arduino

Para la implementación de los sensores se realizaron pruebas en una protoboard y posteriormente se implementaron en una baqueta como se muestra en la Figura 12.

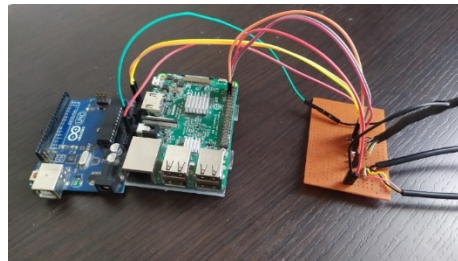


Figura 12. Circuito en baqueta

En la Figura 13 se puede ver la conexión de los sensores implementados para la detección temprana del Covid-19, donde se implementaron los dos sensores por cada variable fisiológica a ser medida.

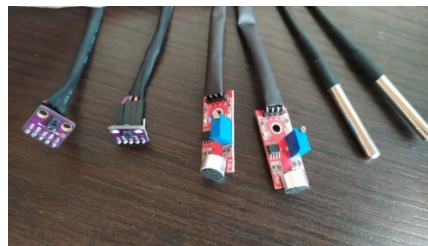


Figura 13. Conexión de sensores

4.5 Base de datos

Para el almacenamiento de los datos obtenidos por los sensores se optó por la utilización de una base de datos relacional donde se utilizó MYSQL, el cual es un sistema de gestión de bases de datos. Se realizó la configuración y la creación de las tablas correspondientes para su correcto funcionamiento donde se almacenará un ID, el cual es un identificador de la medición realizada, también se tiene una columna de fecha y una columna por cada variable fisiológica medida, en este caso el de a temperatura corporal, la saturación de oxígeno, la frecuencia cardiaca y la frecuencia respiratoria, como se observa en la Figura 14.

#	Nombre	Tipo	Cc
<input type="checkbox"/>	1 id	int	
<input type="checkbox"/>	2 fecha	timestamp	
<input type="checkbox"/>	3 frecuencia_cardiaca	int	
<input type="checkbox"/>	4 frecuencia_respiratoria	int	
<input type="checkbox"/>	5 temp	float	

Figura 14. Tabla de almacenamiento de datos

4.6 Servidor en AWS

La configuración del servidor donde se alojará el proyecto una vez finalizado se realizó con los servicios de AWS-Amazon Web Services, para realizar la instalación se utilizó el servicio EC2, el cual es un servicio que

permite la escalabilidad de diferentes aplicaciones asignando capacidad informática en la nube [18]. Para la implementación se instaló el sistema operativo UBUNTU SERVER 20.04, donde fue necesaria la configuración de distintos parámetros para su correcto funcionamiento como la asignación de grupos de seguridad. Se realizó la instalación de PHPMYADMIN para la gestión de la base de datos donde se almacenará la información de las variables fisiológicas.

4.7 Configuración página Web

Para la implementación de la página web se utilizaron lenguajes de programación tales como JavaScript y PHP, en cuanto a la maquetación y diseño se utilizó HTML y CSS, el diseño final se puede evidenciar en la Figura 15.



Figura 15. Diseño de página web

4.7.1 Configuración de cuadro de mandos

Con el objetivo de visualizar los datos de una manera más clara y así mismo obtener información relevante en los datos obtenidos por los sensores y almacenados en la base de datos se desarrolló un cuadro de mandos donde se pueden ver los valores de las cuatro variables fisiológicas medidas, como se observa en la Figura 16.

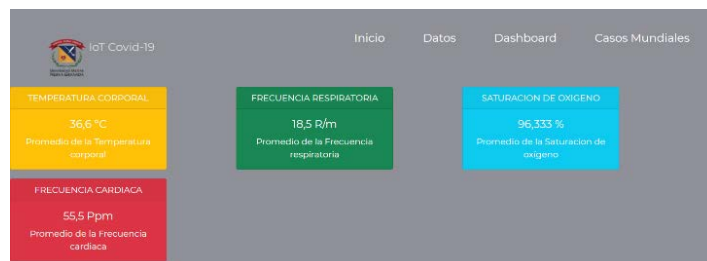


Figura 16. Diseño de cuadro de mandos

4.7.2 Relación de variables fisiológicas

Con el objetivo de encontrar la relación entre las diferentes variables fisiológicas para la detección temprana del Covid-19, se encontraron algunas que permiten la identificación de cambios significativos que corresponden a posibles síntomas a causa de la enfermedad Covid-19, estas relaciones se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación de variables fisiológicas

Variables fisiológicas	Sensores
Temperatura corporal – Frecuencia cardiaca	Ds18b20 – Max30100
Frecuencia respiratoria – saturación de oxígeno	KY-037 – Max30100
Temperatura corporal – saturación de oxígeno	Ds18b20 – KY-037

Para la implementación de las gráficas correspondientes una vez identificadas las relaciones se programaron, la gráfica de la relación entre la temperatura corporal y la frecuencia cardiaca se observa en la Figura 17, la relación entre frecuencia respiratoria y saturación de oxígeno se observa en la Figura 18 y finalmente la relación entre la temperatura corporal y la saturación de oxígeno se puede observar en la Figura 19.



Figura 17. Temperatura corporal vs Frecuencia cardiaca



Figura 18. Frecuencia respiratoria vs saturación de oxígeno

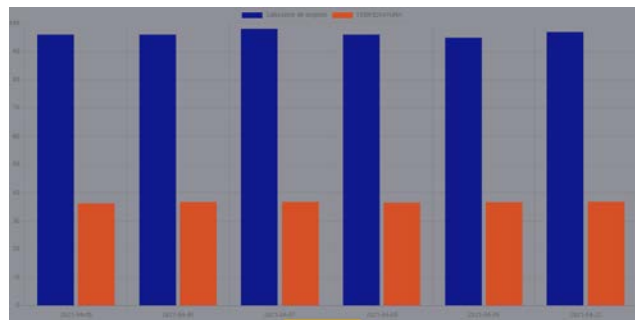


Figura 19. Temperatura corporal vs saturación de oxígeno

5. RESULTADOS

Con el cruce de variables realizado con el objetivo de obtener mayor información en los cambios de los valores para poder realizar un diagnóstico de un posible caso de contagio de Covid-19, se implementaron alertas con el objetivo de mantener informado al usuario de su estado de salud.

Por ello según la relación de las variables y los datos obtenidos en cada una de las relaciones realizadas como la temperatura corporal y la frecuencia cardiaca, la temperatura corporal y la saturación de oxígeno y finalmente la frecuencia respiratoria y la saturación de oxígeno, se identificaron posibles patrones que permitan la identificación de un contagio y generar la alerta correspondiente.

Para la detección temprana de un posible caso de contagio se generó una alerta cuando la temperatura corporal supere los 37.5° C y así mismo se vea un incremento en la frecuencia cardiaca fuera de los rangos normales, es decir por encima de 60 pulsaciones por minuto, la alerta generada se puede observar en la Figura 20.

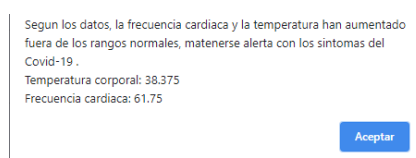


Figura 20. Alerta Temperatura vs Frecuencia cardiaca

Ya que la temperatura es uno de los síntomas más recurrentes entre la población se encuentra contagiada, se generó una alerta cuando la misma supere los 37.5° C incluso si la frecuencia cardiaca se encuentra dentro de los valores normales, esta alerta se puede ver en Figura 21.

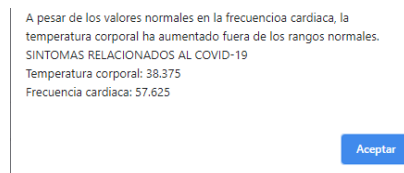


Figura 21. Alerta temperatura corporal vs frecuencia cardiaca II

Para la monitorización de la frecuencia respiratoria y la saturación de oxígeno se realizaron unas alertas que nos indican el estado de salud del usuario, al afectar principalmente las vías respiratorias es de vital importancia la información recolectada por estos sensores, por ello se informara al usuario de la disminución de la saturación de oxígeno en sangre.

La primera alerta cuando se presenten valores anormales en estas mediciones son cuando la saturación de oxígeno se encuentra entre el 93 y 95%, y la frecuencia respiratoria aumenta, informando al usuario de mantenerse alerta en posibles cambios de salud, la siguiente alerta generada fue cuando la saturación de oxígeno disminuye por debajo del 93%, ya que este porcentaje de oxígeno en sangre es muy bajo y puede presentarse síntomas más graves, como se observa en la Figura 22.

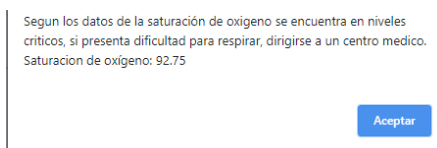


Figura 22. Alerta Saturación de oxígeno y frecuencia respiratoria

Finalmente se realizaron las alertas pertinentes para las variables fisiológicas de la temperatura corporal y la saturación de oxígeno siendo dos de las más importantes en la detección del Covid-19, la primera alerta se genera cuando los valores de la temperatura corporal aumentan y los valores de la saturación de oxígeno disminuyen, indicando al usuario que se tomen medidas de aislamiento preventivo ya que estos son síntomas relacionados al Covid-19, como se ve en la Figura 23.

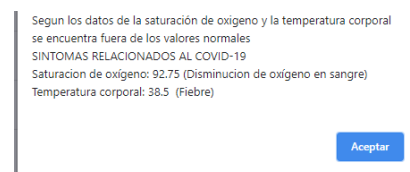


Figura 23. Alerta Saturación de oxígeno y temperatura corporal

Cuando los valores de las variables fisiológicas se encuentran entre los rangos normales se mantendrá informados de su buen estado de salud, como se ve en la Figura 24.



Figura 24. Alerta saturación de oxígeno y temperatura corporal

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las alertas generadas en los diferentes casos que se puedan presentar con las variables fisiológicas indican un correcto funcionamiento, identificando los cambios que se presentan en los datos obtenidos.

El prototipo mantiene informado al usuario de los cambios presentados en sus variables fisiológicas, con diferentes relaciones para indicar un mayor grado de certeza en la identificación de un posible caso de contagio por Covid-19, con los datos recolectados y las relaciones de las variables fisiológicas mantienen más informado al usuario, tales como el incremento en la frecuencia respiratoria pero la disminución en la saturación de oxígeno, esto indicando una respiración deficiente, intentando ingresar una mayor cantidad de oxígeno al sistema respiratorio, pero la transferencia de oxígeno a la sangre no se está realizando de manera correcta lo que no da indicios de afecciones en las vías respiratorias siendo un síntoma recurrente en los pacientes de Covid-19.

Otra relación que se dispuso para alertar un posible caso de contagio es la temperatura corporal que, al sobrepasar los 37,5 °C, siendo un síntoma común en pacientes con Covid-19 y junto con el aumento de la frecuencia respiratoria y la disminución de la saturación de oxígeno, da información relevante en el diagnóstico.

7. CONCLUSIONES

La implementación del sistema de internet de las cosas para la detección temprana del Covid-19 en este proyecto se corroboró el correcto funcionamiento de la arquitectura implementada, en la adquisición, almacenamiento y tratamiento de los datos, los cuales fueron la frecuencia cardíaca, la temperatura corporal, la saturación de oxígeno y la frecuencia respiratoria.

En el tratamiento de los datos se realizó el cruce de las variables fisiológicas donde se identificaron relaciones relevantes entre las mismas que permiten una mayor confianza en el diagnóstico implementado. Permitiendo así un control en el estado de la salud teniendo en cuenta los cambios que se puedan presentar a causa de los síntomas que padecen las personas que han contraído el virus desarrollando la enfermedad del Covid-19.

Siendo este prototipo una medida en la ayuda para la propagación del mismo manteniéndose al tanto del estado de salud y con la disposición de las alertas tempranas para la toma de decisiones y mecanismos que eviten la propagación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por su apoyo en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] OMS, "Coronavirus - Covid-19", 05 2020. Recuperado: <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019>
- [2] CDC - Centro para el control y la prevención de enfermedades., "El COVID-19 y su salud,» 2021. Recuperado: <https://espanol.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>
- [3] OPS - Organización Panamericana de la Salud., "Coronavirus - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud,» 2020. Recuperado: <https://www.paho.org/es/temas/coronavirus>
- [4] Imagen cortesía del Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades, 2020. Recuperado: <https://www.umnews.org/es/news/adjusting-to-coronavirus-threat>
- [5] Medical News Today, "Los Coronavirus,» 08 2020. Recuperado: <https://www.medicalnewstoday.com/articulos/es/lo-que-debes-saber-sobre-los-coronavirus>
- [6] National Geographic, "Los 7 tipos de coronavirus que infectan humanos,» 2020. Recuperado: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/siete-tipos-coronavirus-que-infectan-humanos_15353
- [7] Centros para el control y la prevención de enfermedades, "Síntomas Covid-19,» 12 08 2020. Recuperado: <https://espanol.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/symptoms-testing/symptoms.html>
- [8] Centro para el control y la prevención de enfermedades., "Cómo se propaga el Covid-19,» 2020. Recuperado: <https://espanol.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>
- [9] MEDICO PLUS, "Hipotálamo: partes, estructura y funciones de esta región cerebral,» 2017. Recuperado: <https://medicoplus.com/neurologia/hipotalamo>
- [10] MedicalNewsToday, "¿Cuál es el rango normal de la temperatura corporal?,» Recuperado: <https://www.medicalnewstoday.com/articulos/es/temperatura-normal-del-cuerpo#tabla-de-temperatura>

- [11] VisibleBody, Las 5 funciones principales del sistema respiratorio,» 15 05 2018. Recuperado: <https://www.visiblebody.com/es/learn/respiratory>
- [12] MedlinePLus, Nivel de oxígeno en la sangre,» 2017. Recuperado: <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/nivel-de-oxigeno-en-la-sangre/>
- [13] Fundacion Española del Corazon, Frecuencia cardiaca,» 2018. Recuperado: <https://fundaciondelcorazon.com/prevencion/riesgo-cardiovascular/frecuencia-cardiaca.html>
- [14] MedicalNewsToday, ¿Cuál debería ser mi frecuencia cardíaca?,» 21 01 2016. Recuperado: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/es/291182>
- [15] HET-PRO, Sensor de temperatura DS18B20,» 2016. Recuperado: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-temperatura-ds18b20/>
- [16] ARDOBOT, SENSOR DE SONIDO,» Recuperado: <https://www.ardobot.co/sensor-de-sonido-y-voz-fc-04-ky-037.html>
- [17] mactronica, Sensor de concentracion de oxígeno MAX30100,» 2017. Recuperado: <https://www.mactronica.com.co/sensor-de-concentracion-de-oxigeno-max30100>
- [18] Amazon Web Services, EC2,» 2021. Recuperado: <https://aws.amazon.com/es/ec2/>

Aplicación de la dinámica de sistemas en la estructuración de una herramienta de toma de decisiones

Angie Lizeth Fajardo Orozco¹
Nicolás Andrés Ovelencio Prado²
Javier Fernando Niño Velásquez³
Edwin Andrés Niño Velásquez⁴
Politécnico Grancolombiano
Colombia

En este capítulo se propone una solución a la problemática por la falta de una herramienta que oriente la toma de decisiones para la retención de estudiantes en la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Colombia. Se analiza el flujo de estudiantes inscritos en las asignaturas de la malla del programa Ingeniería de Sistemas de la Institución por medio de un modelo basado en Dinámica de Sistemas. Se analiza las variables y fenómenos que influyen el flujo de inscripciones en cada asignatura. Después, se realiza un proceso de sensibilización y análisis sobre las variables que influyen de manera más significativa dentro del modelo, para presentar algunas recomendaciones a las instancias administrativas del programa. Se concluye que el sistema de inscripciones de asignaturas es un sistema complejo y dinámico, sin embargo, no tiene un patrón de comportamiento que se pueda mantener, ya que depende de momentos específicos en el tiempo. Finalmente, se recomienda a la Institución que en los primeros semestres se realice una nivelación de conocimientos y en los últimos semestres se exija, de acuerdo con los estándares de la industria a la que se integrarán los estudiantes. Asimismo, se recomienda que la Institución fortalezca la divulgación del convenio con el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones MinTIC, además de estudiar la posibilidad de ampliar la oferta de homologación a otros programas del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA y otras Instituciones dedicadas a la formación técnica y tecnológica, para aumentar el número de estudiantes que ingresan por primera vez a la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.

¹ Ingeniera de Sistemas.

Contacto: anfajardo3@poligran.edu.co

² Ingeniero de Sistemas.

Contacto: niovelencio@poligran.edu.co

³ Ingeniero de Sistemas, Especialista en Economía, Especialista en Evaluación Social de Proyectos y Magister en Ingeniería Industrial.

Contacto: jninoval@poligran.edu.co

⁴ Ingeniero de Sistemas.

Contacto: eaninove@poligran.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado busca explicar, analizar y evidenciar cómo un modelo basado en dinámica de sistemas DS es el ideal para tratar el problema de proceso de inscripción de asignaturas. Esto debido a su capacidad para trabajar con sistemas complejos (como el educativo) y a su manera efectiva de procesar datos que, posteriormente, ayudarán a formular estrategias que permitan que los estudiantes que ingresen a la Universidad se gradúen.

En la década de los sesenta, el club de Roma invitó a una reunión en Suiza a Jay Forrester, un ingeniero y profesor que dio inicio a la DS. Allí se le preguntó si la DS podría ser utilizada para modelar la crisis mundial que representaría el aumento poblacional, debido a la demanda de recursos que esto implicaría, a lo que Forrester respondió afirmativamente.

Con el tiempo, se creó un primer modelo que correspondía al sistema socioeconómico mundial que se llamó WORLD1, para luego lanzar una segunda la versión WORLD2 [1]. El exitoso modelo mostró la inevitabilidad de las catástrofes naturales por la contaminación y otros factores de la intervención humana que afectan la tierra. Luego de esto se presentaron nuevas versiones de WORLD que tuvieron en cuenta aspectos que las versiones anteriores habían ignorado.

A través del análisis realizado a los datos provistos por la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano IUPG, se descubrió que la IUPG no cuenta con una herramienta, basada en el flujo de inscripciones, que permita crear estrategias de retención de estudiantes. Por lo mismo, se realizó un modelo con enfoque de DS, que muestre el comportamiento del flujo de inscripciones únicas en asignaturas previamente seleccionadas del programa de Ingeniería de Sistemas en la IUPG. De esta forma se identificaron aquellos factores que podrían reducir el impacto de la deserción en la IUPG, y, por consiguiente, aumentar la demanda en las asignaturas de la Institución.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Dinámica de sistemas

De acuerdo con Forrester [2]:

La Dinámica de Sistemas estudia las cosas y su cambio con el tiempo, cosas que incluyen, lo que la mayoría de las personas encuentra que es importante. Se utiliza la simulación por computadora, tomando los conocimientos que ya tenemos acerca de los detalles que hay en el mundo que nos rodea y muestra por qué nuestros sistemas sociales y físicos se comportan de la manera que lo hacen. Muestra como la mayoría de nuestras propias decisiones políticas son causa de los problemas que solemos culpar a los demás, y cómo identificar las políticas que debemos seguir para mejorar nuestra situación.

Además de la cita mencionada, se sabe que la DS surgió por Forrester, quien realizó modelos como WORLD [1] que proporcionan términos y símbolos ampliamente utilizados para la definición de las características estructurales de un modelo. El mismo Forrester fortaleció la conceptualización de DS y la llevó a nuevos campos de aplicación [3] [4]. A su vez, Sterman [5] describe estos términos y símbolos, junto a su notación de diagramación. Ahora bien, es pertinente dar paso a dos conceptos centrales de la teoría de DS según Sterman:

1. En primer lugar, están los *stocks*, acumuladores que caracterizan el estado del sistema y producen información necesaria para la toma de decisiones y acciones. Además, proporcionan inercia a los sistemas y les dan memoria, al tiempo que crean retrasos al acumular la diferencia entre la entrada a un proceso y su salida. Estos son representados por rectángulos.
2. Después se encuentran los flujos, como aquella tasa de crecimiento del *stock*, los cuales se dividen en flujos de entrada y flujos de salida del *stock*. Estos se representan por medio de tuberías y se identifican con flechas que indican si es flujo de salida o, de entrada. En la Figura 1 se representa gráficamente el *stock*, el flujo y los elementos que componen un flujo.

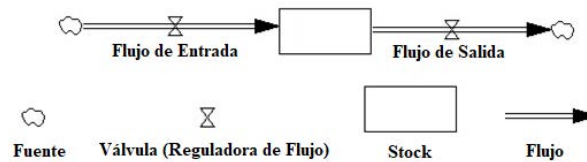


Figura 1. Notación de diagramación de flujos y stocks (Adaptado de [5])

2.2 Malla curricular

El Ministerio de Educación Nacional define la malla curricular como aquella organización de conceptos, procedimientos y actitudes específicas que se planean en el currículo para lograr los propósitos de formación de una institución educativa [6]. Por su parte, la malla curricular del programa de Ingeniería de Sistemas de la IUPG está compuesta por asignaturas, por medio de las cuales se imparte conocimiento de una ciencia específica a los estudiantes. Asimismo, algunas asignaturas sólo se pueden cursar una vez se hayan aprobado sus respectivos prerrequisitos. Cabe aclarar que al conjunto de asignaturas que dependen entre sí se les denomina *línea*, para mayor comprensión de los términos usados en esta investigación. La malla curricular tiene distintos tipos de asignatura que la componen:

- Asignaturas de Facultad: aquellas asignaturas que deben ser vistas por todos los estudiantes de la Facultad de Ingeniería y Ciencias básicas.
- Asignaturas de Programa: aquellas asignaturas que son específicas de Ingeniería de Sistema y se ven únicamente en el programa.
- Asignaturas Institucionales: aquellas asignaturas que deben ser cursadas por todos los estudiantes de la Institución.
- Asignaturas Electivas: aquellas asignaturas que pueden ser elegidas por cada estudiante dependiendo de su oferta.

En la Figura 2 se muestra la respectiva malla curricular del programa de Ingeniería de Sistemas de la IUPG.



Figura 2. Malla curricular del programa Ingeniería de Sistemas de la IUPG [7]

2.3 Resultados recientes en pruebas Saber 11 y PISA

Se investigó el motivo por el cual las asignaturas de primeros semestres tenían una tasa de aprobación baja con ayuda del informe de resultados obtenidos en las pruebas saber 11 de 2017 a 2019 [8]. El informe tiene

distintas agrupaciones de los resultados, entre los cuales se pueden evidenciar género, zona y calendario A o B. Este informe y el de las pruebas PISA de 2018 arrojaron datos de importancia para el análisis del comportamiento estudiantil en Colombia, el cual, en comparación con el comportamiento de los estudiantes de la IUPG, parece tener los mismos resultados, en especial en las materias correlacionadas al área de Matemáticas, como lo son Pensamiento algorítmico, Programación de computadores y Estructura de datos. Dicha comparación entre resultados permite inferir las razones principales por las que muchos estudiantes obtienen bajos resultados en materias relacionadas a las Matemáticas y cómo este desempeño, a su vez, puede producir su deserción.

Como se evidencia en la Figura 3, los resultados obtenidos en el calendario A no superan 52 puntos y en calendario B no superan los 65 puntos. Teniendo en cuenta que las pruebas saber 11 están diseñadas para medir la competencia de los estudiantes antes de entrar a la universidad, resultados como los anteriores reflejan una falta de preparación preocupante para enfrentar los retos de la universidad.

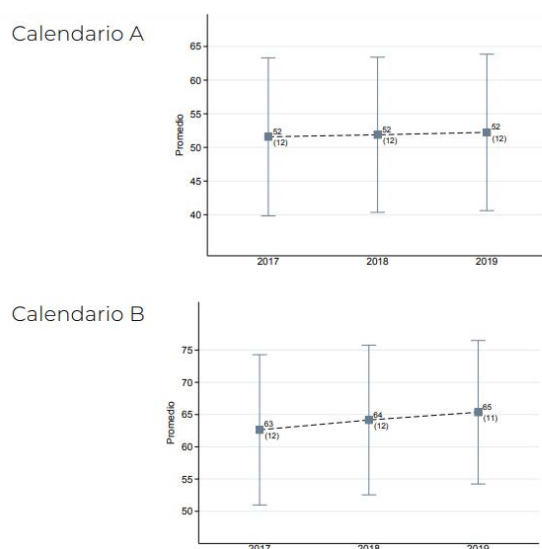


Figura 3. Agrupación de resultados de matemáticas según calendario. Tomado de [8]

2.4 Trabajos previos basados en dinámica de sistemas

DS es un método para mejorar el aprendizaje en sistemas complejos, basándose en la teoría de la dinámica no lineal y el control de retroalimentación desarrollada en matemáticas, física e ingeniería. El éxito de la DS se basa en su capacidad para capturar todo el sistema en lugar de centrarse en comportamientos únicos que podrían llevar a conclusiones inapropiadas [5].

La DS ha sido utilizada en diversas áreas, por ejemplo, una investigación realizada que estudió el comportamiento grupal ante accidentes de incendio en un parque industrial químico [9] a través del uso de un modelo de DS. Este exponente tuvo en cuenta variables como número de noticias oficiales y de noticias en la red, entre otras. Con el modelo se logró llegar a la conclusión de que la influencia del accidente depende del grado público y sensibilidad del accidente de incendio. Esta última se refiere al grado de factores sensibles involucrados en el accidente de incendio.

Otro ejemplo es la investigación que analizó la producción de sal en Indonesia a través de un modelo de DS [10]. Allí, se realizó un estudio sobre la gran demanda de sal en Indonesia debido a su aumento poblacional, frente a su baja producción y calidad. El modelo se realizó teniendo en cuenta los problemas que existen en la industria de sal, lo cual determinó los factores que tienen un efecto significativo en el sistema. Se hicieron estudios sobre el modelo y se concluyó que la producción de sal aún fluctuaba y se veía influenciada por las condiciones climáticas.

Así mismo, con la simulación del modelo se pudo evidenciar que los agricultores tenían ingresos tan bajos que apenas alcanzaba para su supervivencia, por lo que no podían invertir en equipos tecnológicos para la producción de sal en temporada de lluvias.

Como se ha visto hasta el momento, la DS puede aplicarse en análisis de reacciones poblacionales y modelar la producción de un producto. No obstante, en las últimas décadas este enfoque metodológico también ha sido aplicado en otros campos de investigación como el transporte [11, 12], la medicina [13, 14], la economía [10] y el crecimiento poblacional [15].

Por último, en el campo de la educación se realizó un modelo de Dinámica de Sistemas para el análisis de políticas a largo plazo en los programas de pregrado de Brasil [16]. La razón de la instauración del modelo fue que, a pesar de haber tenido un comportamiento creciente desde sus inicios, el comportamiento de los programas de pregrado empezó a estancarse y, para el 2015, no había logrado la meta esperada de matrículas por el Plan Nacional de Educación del 2010. El principal objetivo del modelo fue realizar un análisis de escenarios (considerando diferentes políticas sobre la naturaleza de la educación y el desarrollo económico), que simulara el comportamiento de diferentes aspectos relacionados con el sistema. Los resultados mostraron el potencial de incluir el enfoque dinámico para la comprensión del comportamiento dinámico de la educación superior, la mejora de las políticas y el desarrollo de estrategias efectivas.

3. MÉTODO

Una de las características que tienen los modelos de DS es que son procesos de retroalimentación, mas no secuencias lineales de pasos, por lo cual tienen una refinación continua. En la Figura 4 se muestra cómo el proceso de modelaje rechaza completamente las estructuras iterativas.

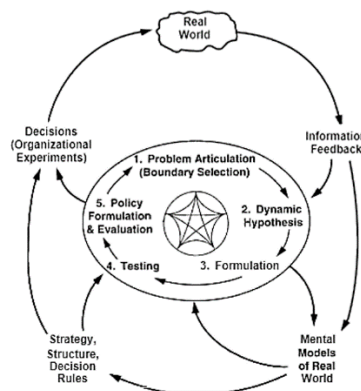


Figura 4. El modelamiento está integrado en los modelos de DS [5]

La retroalimentación puede ocurrir sin un orden específico, es decir, puede ir de un paso a otro y así sucesivamente (interconexiones en el centro del diagrama). Por esta razón, en cualquier modelo de DS se repetirán estos pasos múltiples veces. El modelo propuesto se utilizará para observar comportamientos y proponer alternativas de retención de estudiantes. Debido a que el modelo surge del comportamiento de los estudiantes, entre más semestres se integren a éste, más datos tendrá para alimentar su conocimiento respecto al proceder de cada estudiante, información con la cual podrá proponer nuevas alternativas de comportamiento. De esta forma el modelo muestra su reciprocidad con el mundo real, es decir, al tiempo que el modelo se alimenta de la realidad, el mundo real se alimenta del modelo.

3.1 Herramientas

Los aspectos de mayor relevancia al momento de escoger el software fueron la cantidad de stocks y variables que permitía usar y el precio, por lo que se escogió el software gratis de Vensim que provee una cantidad ilimitada de stocks y de entidades. Por otro lado, el uso de la base de datos provista por la IUPG requirió el uso de un motor de bases de datos para realizar consultas SQL, las cuales permitieron clasificar la información, agregarla al modelo y calcular los datos numéricos que requerían las variables.

3.2 Datos y condiciones de uso de los datos

La Política de Privacidad de la IUPG garantiza y respeta la privacidad de su comunidad y su información [17]. Por lo tanto, fue necesario hacer modificaciones en la base de datos requerida para la construcción del

modelo. Así, los datos que revelan la identidad del estudiante como el nombre, código y documento de identidad fueron anonimizados.

Ahora bien, en cuanto a datos pertinentes para el enfoque de esta investigación se usó, como se dijo antes, la base de datos de la IUPG, pero, en cuanto a datos reales sirvieran para comparar resultados se hizo uso de un informe proporcionado por el Instituto Colombiano para la Evaluación Nacional ICFES en su página web [8], donde muestra los resultados obtenidos en la prueba saber 11 en el periodo de 2017 a 2019. También se utilizó el informe de las pruebas PISA realizadas en el año 2018 [18]. Dichos datos sirvieron como fuente de sustentación en las conclusiones.

3.3 Articulación del problema (selección de límites)

3.3.1 Selección de tema

Un análisis de los datos mostró que el número total de personas que ha ingresado a la IUPG para el programa de Ingeniería de Sistemas, en el periodo de 2012-1 a 2020-1, ha sido alrededor de 1268 estudiantes, de los cuales sólo 518 se han graduado, lo que corresponde al 40,8% de las personas que ingresaron. Asimismo, se hizo el análisis de los datos desde el 2018-1 hasta el 2020-1, periodo comprendido por el modelo, en el cual han cursado asignaturas del programa alrededor de 331 personas. De este grupo de estudiantes sólo 166 se han graduado, lo cual significa que únicamente se graduó el 50,1% de personas. Así, se llegó a la conclusión de que resultaría muy beneficioso para la IUPG contar con una herramienta adecuada que oriente la toma de decisiones de la Institución, respecto a qué estrategias de retención de estudiantes se pueden ejecutar, basándose en los niveles de inscripción de estudiantes en las diferentes asignaturas de un programa.

3.3.2 Variables

Cada una de las variables se marcó con su respectivo nombre y con un número indicador, el cual es el código interno de la asignatura e identifica a cada variable del modelo de manera única. Para las asignaturas de jornada noche se le agregó una N en el nombre.

- Variables independientes:
 - Número de personas que ingresan por primera vez al primer semestre del programa (*Primíparos*): esta variable tiene una escala abierta, ya que los números son enteros. El menor número de primíparos que se vio durante los periodos contemplados por el modelo fue ocho y el máximo número de primíparos en el mismo periodo fue 52.
 - Número de personas que ingresan por primera vez al programa por convenio SENA (*Sena*): esta variable tiene un rango abierto de números naturales, ya que no existe un límite en la cantidad de personas que pueden entrar por medio del convenio SENA a la IUPG. Además, esta variable afecta el modelo mayormente en el séptimo semestre, debido a que las asignaturas que deben cursar los estudiantes de convenio SENA son las últimas de la malla de Ingeniería de Sistemas.
 - La tasa de aprobación según la jornada y el semestre de una asignatura (*Tasa de aprobación*): esta variable puede tener un valor entre cero y uno, lo cual indica el porcentaje de aprobados de una asignatura dictada en un semestre y jornada específica. Cabe mencionar que para aquellas asignaturas que tuvieron más de un grupo en un mismo semestre y jornada, la tasa de aprobación se calculó promediando la tasa de aprobación de cada grupo.
 - Tasa de deserción por pérdida (*Tasa de deserción*): esta variable representa la cantidad de personas que perdieron una asignatura y no volvieron a verla en el futuro. Esto representa el flujo de salida de la asignatura y puede tener un valor entre cero y uno.
 - Tasa de deserción por aprobación (*Tasa de deserción*): esta variable representa la cantidad de personas que aprobaron una asignatura y no volvieron a verla en el futuro. Dicha variable afecta el flujo de entrada de cualquier otra materia que requiera haber cursado primero esta asignatura. Además, puede tener un valor entre cero y uno.

- Personas Antiguas (*Antiguos*): son aquellas personas que no venían en el flujo y entraron a una asignatura de manera repentina, por lo que no pueden ser tenidos en cuenta dentro el flujo de salida de la asignatura anterior. Hubo asignaturas en las que los antiguos podían ser hasta más de la mitad, debido a que son asignaturas que están separadas de su prerrequisito hasta por cinco semestres.
- Tiempo (*Time*): es una variable que indica el periodo de tiempo en el cual se están moviendo los datos, para así cambiar los valores de las variables que dependen de momentos específicos en el tiempo.
- Variables dependientes
 - Entrada a una asignatura (*Entran*): indica el número de personas que ingresan a una asignatura. Esta variable es calculada dependiendo la asignatura. Para las asignaturas que tienen un único prerrequisito y en las cuales no interviene la variable *Sena*, la variable *Entran* se calcula de acuerdo a la ecuación (1).

$$Etn = AprnP + Atgs + Intrl + Hmlgs + (AprnP * TDsrcnA) \quad (1)$$

Para las asignaturas que tienen dos prerrequisitos, las cuales nunca son intervenidas por la variable *Sena*, la variable *Entran* se calcula como lo muestra la ecuación (2).

$$Etn = AprnP + Atgs + Intrl + Hmlgs + (AprnP1 * TDsrcnA1 + AprnP2 * TDsrcA2) / 2 \quad (2)$$

Para las asignaturas que tienen un prerrequisito y son intervenidas por la variable *Sena*, *Entran* se calcula de acuerdo a la ecuación (3).

$$Etn = AprnP + nAtgs + Intrl + Hmlgs + Sn + (AprnP * TDsrcnA) \quad (3)$$

Para las asignaturas de primer semestre, la variable *Entran* es calculada según la ecuación (4).

$$Etn = Atgs + Pmprs \quad (4)$$

Aprobados de una asignatura (*Aprueban*): son las personas que aprueban una asignatura. Esta variable es calculada por medio de la ecuación 5.

$$Aprn = TPrsns * TAprn \quad (5)$$

- Factores externos:
 - Número de homologados (*Homologaciones*): indica el número de homologaciones realizadas para una asignatura en un determinado semestre. Además, esta variable tiene un rango de datos abierto en los números naturales, ya que no existe un número máximo de homologaciones que se pueda realizar para una asignatura. Cabe mencionar que la variable afecta el flujo de entrada de las asignaturas cuyo prerrequisito es cursar la materia homologada.
 - Número de cursos intersemestrales (*Intersemestra*): indica el número de intersemestrales realizados para una asignatura en un determinado semestre. Además, esta variable tiene un rango de datos abierto en los números naturales, ya que no existe un número máximo de Intersemestrales que se pueda realizar para una asignatura. Cabe mencionar que la variable afecta el flujo de entrada de las asignaturas cuyo prerrequisito es cursar la asignatura de curso intersemestral.

A continuación, se resume en un glosario las distintas variables con sus respectivos acrónimos:

- *Entran (Etn)* = personas que ingresan a la asignatura.
- *Antiguos (Atgs)* = número de personas que ingresaron la asignatura de manera repentina.
- *Intersemestral (Intrl)* = número de personas que hicieron un curso intersemestral.
- *Homologaciones (Hmlgs)* = número de personas que hicieron una homologación.
- *Aprueban (Aprn)* = personas que aprueban a asignatura.
- *Aprueban prerrequisito (AprnP)* = número de personas que aprobaron el pre-requisito de la asignatura.

- Tasa de deserción (TD_{srcn}) = tasa que indica el número de personas que reprobaron una asignatura y no la volvieron a inscribir.
- Tasa de deserción por aprobación (TD_{srcnA}) = tasa que indica el número de personas que aprobaron el prerrequisito de una asignatura y nunca inscribieron la asignatura.
- Tasa de aprobación (TA_{prn}) = tasa que indica el número de personas que aprobaron una asignatura.
- Sena (S_n) = personas que ingresan por convenio SENA.
- Primíparos (P_{mprs})= personas que ingresan por primera vez a IUPG a primer semestre.
- Asignatura ($Asgn$)= total de personas que están en un momento dado en una asignatura.

3.4 Complejidad dinámica

Para definir el problema se debe tener en cuenta el concepto de complejidad dinámica, que surge cuando los sistemas cumplen los siguientes criterios:

- *Dinamismo.* Según Sterman, un sistema es dinámico sí puede cambiar en el tiempo [5], criterio que cumple el modelo planteado, pues a lo largo de los semestres la cantidad de estudiantes en las asignaturas del programa varía. Cabe aclarar que las asignaturas pueden haberse dictado por un tiempo y luego desaparecer o cambiar de nombre. Otro de los aspectos que hace que el modelo sea dinámico es que las asignaturas cambien de docente constantemente; sea porque les asignen otro docente o porque el profesor titular ya no trabaje en la IUPG.
- *Alto acoplamiento.* Esto se refiere a que todos los actores en el sistema interactúan fuertemente con su entorno. En el modelo, un ejemplo de esto es que los docentes están altamente relacionados con la aprobación y reprobación de las asignaturas, al igual que los estudiantes. Asimismo, se evidencia que la relación entre sí de las asignaturas tiene un alto acoplamiento, esto debido a que en todo el modelo existen asignaturas que son prerrequisitos de otras.
- *Grado de retroalimentación.* Debido a los estrechos vínculos entre los actores, las acciones se retroalimentan a sí mismas. Las decisiones tomadas por un individuo afectan el estado del mundo y provocan que otros actúen, dando lugar una nueva situación que influye en próximas decisiones [5]. En relación con lo anterior, el modelo cuenta con un bajo grado de retroalimentación, pues si un estudiante pierde una asignatura debe repetirla, lo que causa que la retroalimentación esté dentro de cada asignatura sin necesidad de que ocurra en asignaturas pasadas. Así, no se afectarán las decisiones de cada individuo, tomadas antes del periodo de la asignatura.
- *Falta de linealidad.* Es un efecto raramente proporcional a la causa. Asimismo, lo que sucede localmente en un sistema frecuentemente no se aplica en regiones distantes [5]. El modelo planteado es no lineal, pues, aunque un docente apruebe a todos los estudiantes, una asignatura no va a crecer hasta el infinito. Otro factor que muestra la no linealidad del sistema son los cambios que se realicen en las primeras asignaturas del sistema, los cuales no afectan las últimas asignaturas sino hasta después de varios semestres. Asimismo, al realizar un análisis sobre las asignaturas se puede notar que estas no crecen de manera lineal.
- *Dependencia de la historia.* Elegir un camino, impide tomar otras vías al mismo tiempo y determina donde finaliza el trayecto, afirmación que argumenta una dependencia del camino. También implica que no se puede devolver por el camino elegido, puesto que las acciones son irreversibles [5]. Así se comprueba que el modelo es dependiente de la historia, ya que un estudiante no puede repetir una asignatura que ya aprobó, de la misma forma que un estudiante que reprueba no puede retractar su inscripción a la asignatura que perdió. Por ejemplo, si un estudiante realizó el curso de *Pensamiento algorítmico* y lo reprobó, no puede decidir no haberla visto o quitar el resultado obtenido; puede ver nuevamente la asignatura, pero seguirá teniendo su reprobación registrada en el sistema.
- *Adaptabilidad.* Según Sterman, un sistema es adaptable si las capacidades y las reglas de decisión de los agentes en un sistema complejo cambian con el tiempo. En el modelo se visualiza la adaptabilidad en aquellos estudiantes que pasan a la jornada nocturna de una asignatura y, de esta forma, disminuyen el

número de estudiantes de la jornada diurna. Por otro lado, su adaptabilidad está en que un estudiante pueda decidir realizar un curso intersemestral en vez de inscribir cierta asignatura en un semestre.

- *Contradicción.* Según Sterman, los sistemas son contradictorios si la causa y el efecto están distantes en el tiempo, lo cual, en el modelo, se evidencia en las asignaturas que están distanciadas de su prerrequisito dos o más semestres en la malla.
- *Resistencia a las políticas.* Muchas de las soluciones que parecen respuestas obvias a los problemas fallan o empeoran una situación. En este sentido, aunque pareciera que la tasa de aprobación es la respuesta más evidente, no todo depende ésta; por más que la tasa sea del 100% en una asignatura previa a otra, no se suele alcanzar a completar el número de estudiantes presentes en la asignatura siguiente.
- *Caracterización por disyuntivas.* La respuesta esperada entre dos canales de retroalimentación a corto plazo es diferente a la de dos canales de retroalimentación a largo plazo [5]. En el modelo planteado, esta caracterización se presenta en las asignaturas cuyo prerrequisito está separado hasta por cinco semestres de la asignatura, pues dicha distancia temporal hace que la asignatura tenga una mayor deserción, debido a que el modelo está planteado para simular cinco semestres. Por lo anterior, asignaturas como *Análisis de algoritmos* y *Sistemas digitales y ensambladores* deben ser ajustadas de forma manual para que los estudiantes organicen sus horarios e inscripciones con base en los datos reales.

3.5 Formulación de hipótesis iniciales

Una de las teorías actuales sobre el comportamiento problemático es que en los primeros semestres hay una tasa baja de aprobación de asignaturas, mientras que en últimos semestres hay una tasa alta de aprobación. Esto genera que la tasa de estudiantes de primeros semestres que desertan se incremente. Por lo tanto, se plantea la hipótesis 1 (H1): *para disminuir la deserción universitaria es necesaria una variación en las tasas de aprobación respecto a las actuales se puede alterar la cantidad de inscripciones únicas en las asignaturas.*

Otra de las teorías actuales sobre el comportamiento problemático es que la cantidad de inscripciones únicas en el programa es baja, debido a que la cantidad de personas que ingresan al programa es también baja. Lo anterior conlleva el planteamiento de una segunda (H2), tercera (H3) y cuarta hipótesis (H4):

H2: *al aumentar el número de estudiantes matriculados por primera vez en la IUPG (Primíparos), el número de inscripciones únicas de asignaturas aumenta de forma no lineal.* H3: *al aumentar el número de estudiantes matriculados por primera vez en la IUPG (Primíparos), el número de inscripciones únicas de asignaturas aumenta de forma no esperada.* H4: *al aumentar el número de estudiantes matriculados por primera vez en la IUPG (Sena) por medio del convenio SENA, el número de inscripciones únicas de asignaturas aumenta de forma no esperada.*

3.6 Formulación del modelo de simulación

3.6.1 Especificación de la estructura

El modelo estará compuesto principalmente por las asignaturas de programa que componen la malla curricular de Ingeniería de Sistemas y será diferenciado entre jornada diurna y nocturna. Entre las asignaturas a tener en cuenta no se incluyeron *Métodos numéricos* y *Telecomunicaciones*, debido a que son asignaturas que no pueden representarse como flujo. Asimismo, el modelo también contará con tres asignaturas de facultad, las cuales son *Pensamiento algorítmico*, *Programación de computadores* y *Opción de grado*, esto debido a que, *Pensamiento algorítmico* y *Programación de computadores* son asignaturas de primeros semestres y otras asignaturas presentes en el modelo dependen de estas. A pesar de que los *Énfasis profesionales* son un factor que podría afectar el comportamiento del flujo, no se tuvieron en cuenta, ya que los tres énfasis pueden cursarse en séptimo y octavo semestre en cualquier orden, además, en la base de datos provista por la IUPG, no hay una diferenciación entre los tres. Por otro lado, *Opción de*

grado es un factor importante para determinar los graduados en el modelo. Cabe mencionar que las asignaturas de los últimos semestres del programa no aparecen en la jornada diurna del modelo, ya que son asignaturas que sólo se han dictado en la noche en el tiempo contemplado por el modelo.

Además, cada asignatura en el modelo se compone por los mismos elementos que se muestran en la Figura 5, la cual muestra un flujo de entrada y dos flujos de salida. El flujo de entrada indica las personas que ingresarán a ver la asignatura, el flujo de salida del factor etiquetado como *aprueban* indica el número de personas que aprobaron la asignatura y el flujo de salida del factor etiquetado como *desertan* indica las personas que perdieron la asignatura y no la volvieron a cursar.

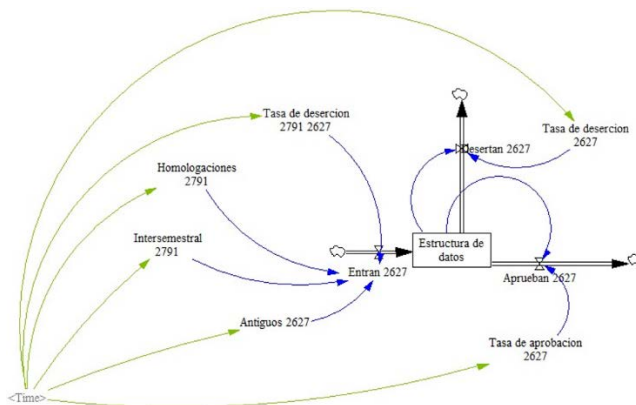


Figura 5. Variables presentes en una asignatura

De la misma forma, en la Figura 5 existen flechas azules y verdes, esto debido a que hay dos tipos de variables: las flechas azules indican relaciones en el modelo entre las variables que se unen por dichas flechas y las verdes salen de variables tipo *time*, las cuales representan el comportamiento de cada variable que depende de esta en un tiempo específico.

3.6.2 Relaciones y condiciones iniciales

En el modelo, las asignaturas estarán relacionadas de la misma forma en que lo hacen en la malla curricular del respectivo programa. Además, cada uno de los flujos presentados en la especificación de la estructura se puede ver afectado por algunas de las variables anteriormente mencionadas. En cada asignatura pueden suceder tres casos que afectarán el flujo de entrada de diferente manera.

El primero sucede cuando la asignatura tiene un único prerrequisito. Como se aprecia en la Figura 6, el flujo de entrada se verá afectado por variables como *Intersemestral*, *Antiguos*, *Homologaciones*, *Tasa de deserción* y el flujo de salida de su respectivo prerrequisito. Para asignaturas a las cuales ingresan los estudiantes por convenio SENA, la variable *Sena* también afecta el flujo de entrada de la asignatura.

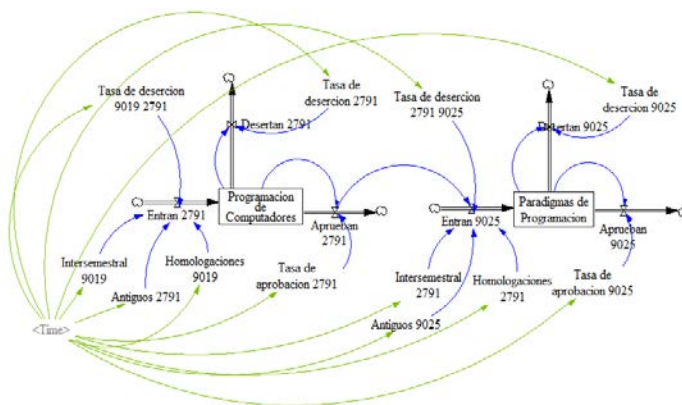


Figura 6. Asignatura con un prerrequisito

Existe también un segundo caso, ilustrado en la Figura 7, que se evidencia cuando una asignatura tiene dos prerrequisitos (el máximo de prerrequisitos en el modelo para una asignatura). En este caso, el flujo de

entrada se verá afectado por variables como *Intersemestral*, *Homologaciones*, *Tasa de deserción*, *Antiguos* y el flujo de salida de sus dos prerequisites dividido entre dos.

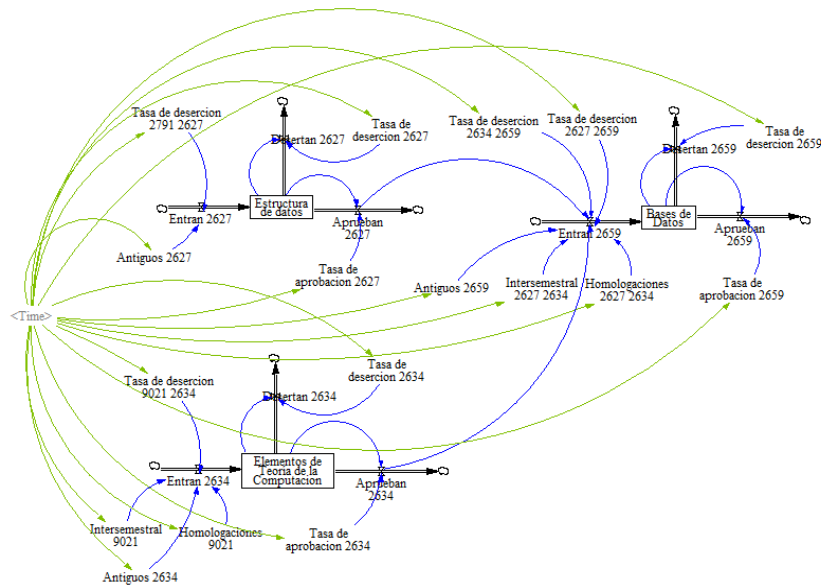


Figura 7. Asignatura con dos prerequisites

Existe un tercer caso, que se puede apreciar en Figura 8, en el que la asignatura es de primer semestre y el flujo de entrada se verá afectado únicamente por la variable *Primiparos* y por la variable *Antiguos*.

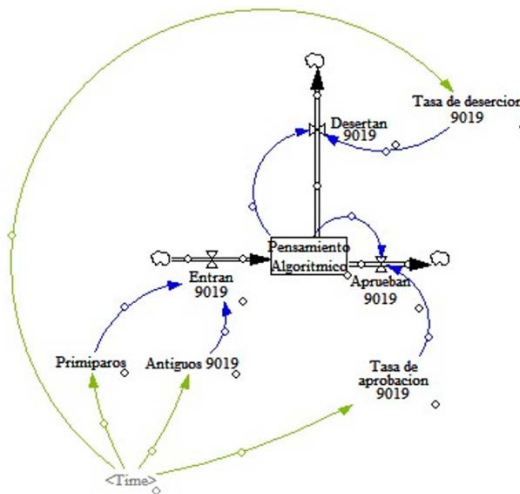


Figura 8. Primera asignatura del modelo

En las variables *Homologaciones* e *Intersemestrales* no hay un ingreso fijo de estudiantes, ya que la cantidad de homologados y estudiantes de intersemestral es diferente cada semestre y no se ve afectada por la cantidad de estudiantes que reprueban un curso o por la cantidad de estudiantes presentes en el curso. Así, estos datos deben ingresarse de forma manual para que el flujo del modelo no se vea altamente afectado y entrarán en el flujo de salida de la asignatura homologada o aprobada en un curso intersemestral.

3.7 Pruebas

El modelo fue creado con base en la información provista por la IUPG. Para calcular los valores que se asignaron a las variables del modelo, se integraron los datos a una base de datos relacional compuesta por tres tablas y sobre la base de datos se realizaron distintas sentencias SQL según la necesidad.

En la base de datos existe un campo llamado *Primiparo*, el cual indica si el semestre en el que el estudiante inscribió una asignatura es su primera inscripción en la IUPG. Para la variable *Primiparos* del modelo se

realizó una sentencia, la cual contó la cantidad de personas que ingresaron a *Pensamiento algorítmico* (la primera asignatura del programa) en una jornada específica. A su vez, el campo primíparo se marcó como 'Sí' en la base de datos. En la base de datos también se puede encontrar un campo que indica si la asignatura fue homologada, para lo cual se realizó una consulta que contó el número de personas que homologaron una asignatura en un semestre y jornada específicos. Además, los datos obtenidos se agregaron a cada una de las variables *Homologados* en el modelo.

Por otro lado, en la base de datos se pueden encontrar periodos como 2018-3, 2018-4, 2019-3 y 2019-4, los cuales indican que esas asignaturas fueron cursadas como intersemestrales. Para asignar los valores de estas variables en el modelo se realizó una consulta que contó cuántas personas homologaron una asignatura en un semestre y jornada específicos. De la misma forma, en la base de datos se encuentra un campo que indica si el estudiante aprobó o no la asignatura, para lo cual se realizó una consulta que contó la cantidad de personas que aprobaron una asignatura en una jornada y semestre específicos, como también la tasa de aprobación que tenía cada una de las asignaturas. Igualmente, en la base de datos se evidencia un campo que identifica las personas de convenio SENA y, por medio de una sentencia SQL, se cuentan las personas que ingresan a la universidad por parte de convenio SENA en un periodo específico.

En el modelo se encuentra un flujo de salida que representa la deserción por parte de estudiantes que perdieron una asignatura y no la volvieron a cursar. Este dato fue obtenido por medio de una sentencia que filtró en la base de datos las personas que perdieron la asignatura y contó las que no la volvieron a ver en un futuro. Asimismo, en el modelo se evidencia una variable llamada deserción, la cual representa las personas que aprobaron la asignatura y se retiraron de la IUPG. El dato respectivo a cada variable de deserción se obtuvo por medio de una sentencia en la base de datos que filtró el número de personas que aprobaron una asignatura en un semestre y jornada específicos y contó las personas que no cursaron la siguiente asignatura.

Por último, en el modelo algunas asignaturas cuentan con la variable *Antiguos*, la cual representa el número de personas que entraron a la universidad antes del 2018-1 y que no cursaron una asignatura sino hasta después del 2018-1. Para obtener el dato de la variable *Antiguos* se realizó una consulta que contó la cantidad de personas que cursaron una asignatura y se restó al número de personas que estaban en el modelo. Al poner en funcionamiento el modelo se refleja que los datos son muy cercanos a la realidad, por lo que el modelo cumple con los requisitos para su propósito.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Teniendo en cuenta que el modelo muestra la cantidad de inscripciones únicas para cada semestre, se analizó su comportamiento bajo distintos escenarios. Como se notará, cada uno de los análisis incluye los resultados del flujo original observado en el programa de Ingeniería de Sistemas de la IUPG, a partir de allí, se plantean situaciones probables para evaluar las hipótesis planteadas en el método.

4.1 Sensibilización por incremento en la variable *Primíparos*

La primera prueba realizada fue cambiar la cantidad de personas que ingresaban por primera vez a la IUPG (*Primíparos*). Además, debido a que el modelo se diferencia en jornada diurna y jornada nocturna, el cambio se realizó en cada jornada.

En la Figura 9 se hace una comparación entre los tres cambios realizados, la cual evidencia que la cantidad de inscripciones únicas en la carrera aumenta en la misma proporción cada semestre. Dicho aumento se refleja en el acumulado de *primíparos* ingresados hasta el semestre actual, más la mitad del acumulado de *primíparos* que ingresaron el semestre anterior. La ecuación (6) muestra la función recursiva que representa el aumento del flujo en cada semestre, donde a es la constante en la que el flujo crece cada semestre y x el número de *primíparos* que ingresarán cada jornada.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 1 \\ 2x + f(x - a) + \frac{f(x-a)}{2}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

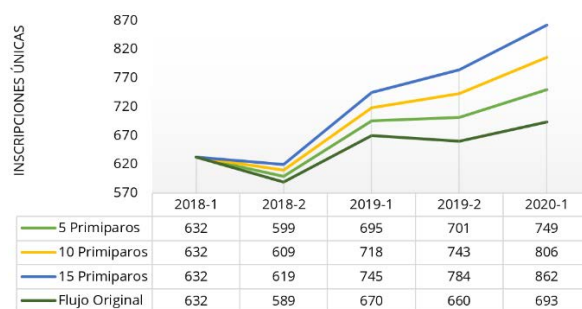


Figura 9. Comparativa en el total de inscripciones únicas en la carrera con los cambios en la variable *primiparos*

Así, el comportamiento presentado no crece de forma lineal, debido a la estructura del modelo, donde un estudiante cursa una cantidad diferente de signaturas cada semestre. No obstante, aunque el aumento no sea lineal, el flujo de inscripciones sí crece según las expectativas, debido a que los datos no se ven alterados de ninguna manera por aprobación o deserción.

4.1.1 Sensibilización por incremento en la variable *Sena*

La segunda prueba realizada en el modelo fue variar el número de personas que ingresaban por primera vez a la IUPG por medio del convenio SENA. Dado que en el periodo contemplado por el modelo los estudiantes de convenio SENA siempre ingresaron a la jornada nocturna y, en su mayoría, a los últimos semestres, se analizó como se comportaba el número de inscripciones únicas en el programa y se graficó su comportamiento para los dos últimos semestres.

En la Figura 10 se observa la comparación de los tres cambios realizados en la variable *Sena* y se evidencia que el número único de inscripciones en los últimos dos semestres aumentó de manera irregular, dado que, en algunos casos la cantidad de inscripciones aumentó lo mismo que el número de personas agregadas más una pequeña cantidad adicional. En otros casos, el aumento de inscripciones fue menor al agregado. De esta forma, se concluyó que aumentar la variable *Sena* aumentará el número de inscripciones únicas en el programa. Este crecimiento se comporta de la manera esperada.

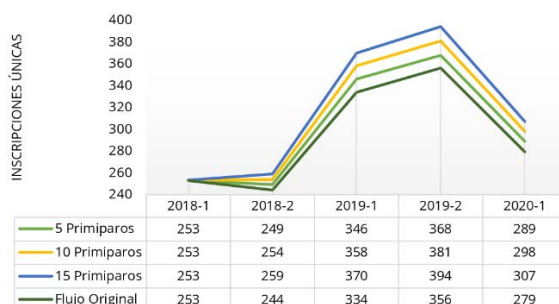


Figura10. Comparativa en el total de inscripciones únicas en la carrera con los cambios en la variable *primiparos*

4.1.2 Sensibilización de las tasas de aprobación

La tercera prueba en el modelo se realizó cambiando las tasas de aprobación, las cuales se presentan en una asignatura específica durante el tiempo contemplado por el modelo. Por ejemplo, si una asignatura obtuvo las siguientes tasas de aprobación: 2018-1: 0.1, 2018-2:0.2, 2019-1:0.3, 2019-2:0.4 y 2020-1:0.5, el dato a tener en cuenta para realizar el cambio en la mínima tasa de aprobación de dicha asignatura será 0.1 y el dato a tener en cuenta para realizar el cambio en la máxima tasa de aprobación será 0.5. Además, se analizó el comportamiento del total de inscripciones únicas por semestre, incluyendo jornada diurna y jornada nocturna, debido a que las asignaturas de los dos últimos semestres del programa no se ofertaron en jornada diurna, por lo que todos los estudiantes las cursaron en la jornada nocturna.

- *Máxima tasa de aprobación.* Se realizó el cambio en ambas jornadas al tiempo, cambiando la variable *Tasa de aprobación* de cada asignatura por la máxima tasa de aprobación obtenida para esa asignatura, durante el lapso contemplado por el modelo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.



Figura 11. Modificación en jornada nocturna y jornada diurna con la máxima tasa de aprobación

En los resultados conseguidos al realizar el cambio en la tasa de aprobación, se puede evidenciar que la cantidad de inscripciones únicas en el programa no aumentó significativamente, ya que la diferencia entre el total acumulado del flujo original y el flujo obtenido al realizar el cambio es cercana a cero. Este comportamiento se da porque la tasa de aprobación máxima es cercana a la tasa de aprobación que se tuvo en realidad.

- *Mínima tasa de aprobación.* Se realizó el cambio para ambas jornadas al mismo tiempo, de tal manera que las variables de la tasa de aprobación de todo el modelo contemplaran la mínima cantidad de aprobación obtenida en cada asignatura. Los resultados obtenidos después del cambio se muestran en la Figura 12.

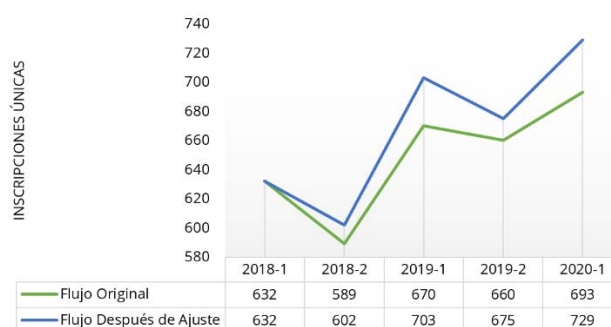


Figura12. Modificación en jornada diurna y nocturna con la mínima tasa de aprobación

Al analizar el comportamiento obtenido del cambio en las dos jornadas, se evidencia que hay un incremento en el número de inscripciones únicas a asignaturas del programa. Este incremento es debido mayormente a la jornada nocturna, pues en la jornada diurna no hay un cambio significativo en el número de inscripciones al poner una tasa mínima de aprobación.

- *Máxima tasa de aprobación-mínima tasa de aprobación.* Se realizó el cambio en la jornada diurna y en la jornada nocturna al mismo tiempo, de tal manera que los primeros cuatro semestres de ambas jornadas tuviesen la máxima tasa de aprobación, los últimos dos semestres de la jornada diurna la mínima tasa de aprobación y los últimos cuatro semestres de la jornada nocturna la mínima tasa de aprobación. Los resultados obtenidos al realizar el cambio se evidencian en la Figura 13.

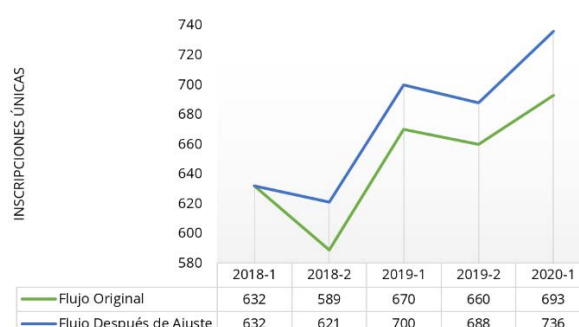


Figura 13. Modificación en la jornada diurna y nocturna con máxima tasa de aprobación en primeros cuatro semestres y mínima tasa de aprobación en los últimos cuatro semestres

- *Mínima tasa de aprobación-máxima tasa de aprobación.* Se realizó el cambio para ambas jornadas, de tal manera que la variable *Tasa de aprobación* de cada asignatura presente en los primeros cuatro semestres del modelo tuviese la mínima tasa de aprobación obtenida en el lapso contemplado por el modelo. Asimismo, se buscó que la variable *Tasa de aprobación* de las asignaturas presentes en los dos últimos semestres de la jornada diurna fuera la máxima y la misma variable de las asignaturas presentes en los últimos cuatro semestres de la jornada nocturna fuera la máxima. Los resultados obtenidos al realizar el cambio se muestran en la Figura 14.

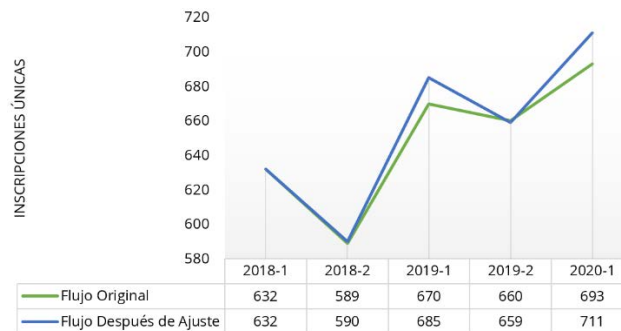


Figura 14. Modificación en la jornada diurna y nocturna con mínima tasa de aprobación en los primeros cuatro semestres y máxima tasa de aprobación en los últimos cuatro semestres

4.1.3 Comparativa de resultados en cambios de la variable *Tasa de aprobación*

Se realizó una comparativa de los resultados obtenidos al cambiar las tasas de aprobación, en la Figura 15 se muestra la comparativa de los cambios realizados en la variable *Tasa de aprobación* de ambas jornadas.

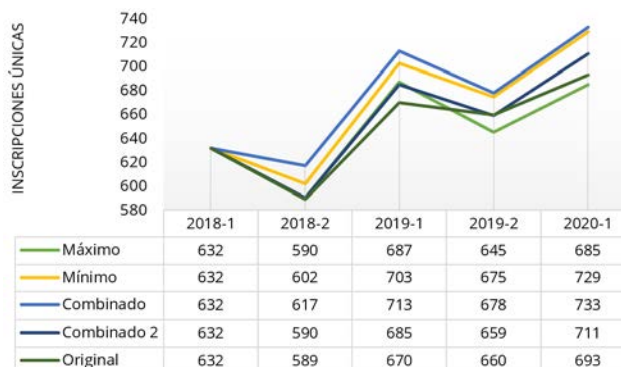


Figura 15. Comparativa de cambios en jornada nocturna y jornada diurna con máxima tasa de aprobación, mínima tasa de aprobación y tasa de aprobación máxima en primeros semestres, con tasa de aprobación mínima en últimos semestres

En la Figura 15, se observa que las inscripciones únicas por semestre aumentan en mayor medida cuando se aumenta la tasa de aprobación en los primeros cuatro semestres y en los últimos cuatro disminuye. Este comportamiento sucede, gracias a que los estudiantes de primeros semestres desertan en menor medida. Además, la tasa de deserción en los últimos semestres es menor. Por ende, al proponer una tasa de aprobación menor, los estudiantes no van a desertar; por el contrario, van a repetir asignaturas, lo cual aumenta el total de inscripciones únicas por semestre.

5. CONCLUSIONES

La complejidad dinámica del sistema de inscripciones de asignaturas del programa de Ingeniería de Sistemas del Politécnico Gran Colombiano fue evaluada a la luz de los nueve criterios sugeridos en la literatura. Se verificó que todos ellos se cumplían; no obstante, es válido señalar que la retroalimentación se presenta dentro del subsistema conformado por cada asignatura y no entre asignaturas. Con esta verificación se garantiza que el sistema puede ser analizado a la luz de alguna de las metodologías/disciplinas diseñadas con enfoque en sistemas complejos. En el caso de la presente investigación se optó por crear un modelo basado en Dinámica de Sistemas.

Con ayuda del modelo se descubrió que no hay un patrón de comportamiento de los estudiantes que se mantenga en el tiempo. Aun cuando el modelo que simula el comportamiento de inscripciones únicas en la carrera se comporta en forma de flujo, también depende de factores muy específicos en el tiempo, como lo son los cursos intersemestrales, las homologaciones, la rotación de profesores y el hecho que los estudiantes pueden escoger el semestre en el que cursan una asignatura. Por lo tanto, un modelo de Dinámica de Sistemas del caso estudiado en este proyecto no tendría mayor capacidad predictiva. No obstante, sí tiene una alta capacidad explicativa y habilita a los tomadores de decisiones para interpretar cómo distintos factores están incidiendo sobre el proceso de inscripción de asignaturas de los estudiantes del programa.

El proyecto habla del número de inscripciones únicas en asignaturas como la variable a ser explicada. Esto puede resultar extraño pues no es una preocupación de la institución conocer este número en particular; sin embargo, se escogió esta variable porque permite observar indirectamente el comportamiento de otros fenómenos como la deserción y la salud financiera del programa. Naturalmente, un mayor número de inscripciones está asociado con mejores indicadores en otras áreas.

El modelo presentado es replicable para cualquier otro sistema complejo similar, es decir, para un sistema que refleje el flujo de inscripciones a través de la malla de un programa académico en una Institución de Educación Superior. Esta propiedad del modelo se asegura a partir del hecho de que esta investigación identificó los posibles factores que afectan el proceso de inscripciones y que son registrados en las bases de datos institucionales. Bastaría con modificar la cantidad de acumuladores, las fórmulas y las condiciones iniciales para tener otra representación funcional. Asimismo, el modelo es escalable pues como se mostró en el documento, todas las asignaturas son subsistemas con el mismo relacionamiento de variables y son fácilmente interconectables con otros subsistemas. Una buena analogía sería comparar cada asignatura modelada con una ficha de lego que está construida para acoplarse a cualquier otra ficha y permitir la construcción de la estructura que desee el modelador.

Por medio del modelo se aprendió que existen múltiples factores que inciden sobre el comportamiento de los estudiantes de Ingeniería de Sistemas al realizar la inscripción de materias. De hecho, se descubrió que la información registrada típicamente por una Institución de Educación Superior no es suficiente para explicar este fenómeno y que hay variables de tipo no académico que influyen sobre las decisiones de las personas. Entre los factores académicos que inciden en la cantidad de inscripciones está el número de estudiantes que homologan o cursan intersemestrales, tasas de deserción, tasas de abandono de las materias, la cantidad de primíparos, la cantidad de nuevos estudiantes de convenio SENA y la tasa de aprobación. Las tres últimas variables son precisamente sobre las que tiene mayor control la Institución y fueron por tanto seleccionadas para formular algunas hipótesis sobre las que se concluye y se hacen algunas recomendaciones a continuación.

Sobre la hipótesis 1 (H1)

Para comprobar la primera hipótesis se hicieron cuatro modificaciones sobre las tasas de aprobación: asignar la mínima tasa registrada en cada asignatura, asignar la máxima tasa registrada en cada asignatura, asignar la mínima tasa registrada en materias de los cuatro primeros semestres y la máxima tasa en materias de los últimos semestres, y, asignar la máxima tasa registrada en materias de los cuatro primeros semestres y la mínima tasa en materias de los últimos semestres. Con las cuatro modificaciones hubo cambios, aunque estos fueron significativamente menores en la jornada diurna. Por lo tanto, se aporta evidencia para apoyar H1. La mejor combinación para aumentar el número de inscripciones únicas de forma conjunta en las jornadas del día y la noche es aumentar las tasas de aprobación al inicio de la carrera y disminuirlas en la etapa final.

Es importante aclarar que no se intenta decir que hay que aumentar o disminuir las tasas de aprobación al antojo de las directivas o únicamente para obtener mejores cifras. Por el contrario, se está pensando en la oportunidad de dar a los estudiantes del programa una educación más incluyente y significativa para el resto de sus vidas. Estos dos objetivos pueden lograrse si en los primeros semestres se hace una nivelación de conocimientos y se mitigan los riesgos de deserción y en los últimos semestres se exige de acuerdo con los estándares de la industria a la que se integrarán pronto los estudiantes.

Se recomienda que durante los primeros semestres exista la posibilidad de nivelar saberes entre los estudiantes que llegan, toda vez que tienen diferentes colegios de origen, con estándares de calidad muy distintos. Esto sustentado en los resultados de las pruebas saber 11 y PISA. Estos escenarios de nivelación pueden darse en los mismos cursos, pero como el acompañamiento debe ser constante, tendría que extenderse a asesorías extra clase.

Otra forma de involucrar a los estudiantes de primeros semestres en su formación, en lugar de provocar su rechazo, sería implementar un sistema de evaluación formativa y por competencias. Formativa porque el profesor en vez de pedir la entrega de un ejercicio y simplemente calificarlo; debería adelantar una fase de diagnóstico, una de retroalimentación y una de evaluación ponderando la evolución del estudiante. Asimismo, la evaluación se haría plenamente por competencias, tanto duras como blandas; a diferencia de lo que sucede muchas veces cuando el docente simplemente pide que el producto funcione perfectamente y no se evalúa el proceso que llevo a cabo el alumno, es decir, es una calificación basada enteramente en la funcionalidad, no en saberes ni habilidades.

Por otra parte, en los últimos semestres se recomienda que la evaluación aumente su exigencia, no por el hecho de aumentar la tasa de reprobación, sino porque es importante que los estudiantes se enfrenten a situaciones tan similares como sea posible a lo que enfrentarán o ya enfrentan en el trabajo. En este orden de ideas, la calificación en los últimos semestres no debería ser únicamente por competencias como se sugirió para los primeros semestres; también debería exigir de los estudiantes un trabajo perfectamente funcional y que sea presentado de forma profesional.

De la misma forma, si se proporciona a los estudiantes de últimos semestres mayor autonomía, sin que signifique que no va a haber acompañamiento, se podría tener una mayor variación de las calificaciones que consigan y se acostumbrarán a ver que los resultados dependen directamente de su esfuerzo. Esta autonomía puede surgir en proyectos de autoestudio con objetivos abiertos o en dejar algunos contenidos para que sean cubiertos de forma individual y que sean evaluados con el mismo nivel de exigencia que los temas vistos en clase.

Sobre la hipótesis 2 (H2) y la hipótesis 3 (H3)

Con el fin de observar la segunda y la tercera hipótesis se realizó un análisis de sensibilidad sobre el número de primíparos: se sumaron cinco, diez y quince estudiantes de primer semestre al número original. Se mostró que el aumento en esta variable provoca un cambio no lineal en el número de inscripciones únicas de asignaturas, seguramente debido a factores como la falta de uniformidad en la cantidad de materias de programas que se cursan en cada semestre. Por otro lado, gracias al modelo se identificó que se puede calcular el aumento de las inscripciones semestre a semestre por medio de una fórmula, además, se logró determinar que esta fórmula sigue funcionando de la misma manera sin importar cuántos primíparos ingresen, es decir, el comportamiento sigue siendo el esperado. Entonces, puede decirse que se ha aportado evidencia para sustentar H2 y rechazar H3.

El hecho de que las inscripciones no aumenten en una proporción mayor a la esperada no significa que incorporar estudiantes no sirva para mantener la salud del programa. Como lo muestran los resultados, a mayor número de primíparos, mayor número de inscripciones. Por lo tanto, la recomendación es tratar de crear y fortalecer estrategias de matrícula de nuevos estudiantes.

Sobre la hipótesis 4 (H4)

Como los estudiantes de convenio SENA homologan múltiples asignaturas y su formación en el Politécnico Grancolombiano se enfoca en las materias de profundización de la carrera, para estudiar H4 se observó el número de inscripciones en los dos últimos semestres y cómo esta cantidad cambiaba al aumentar los estudiantes de primer semestre del convenio. El aumento en el número de nuevos estudiantes se hizo en tres niveles: cinco, diez y quince. Se observa que la cantidad de inscripciones aumenta en un rango proporcional a la cantidad en la que se incrementa el número de nuevos estudiantes de convenio SENA. Por lo tanto, se ha aportado evidencia para rechazar H4, pues el comportamiento obtenido corresponde al esperado.

Para finalizar, es apropiado resaltar que el proyecto no sólo buscó estrategias para mejorar el número de inscripciones en las asignaturas del programa de Ingeniería de Sistemas en la IUPG, sino que investigó los factores que inciden en este sistema, teniendo en cuenta su complejidad y dinamismo. Así, la IUPG cuenta con recomendaciones que, sustentadas en un modelo efectivo de DS, permitirán aumentar la cantidad de inscripciones únicas en el programa, disminuyendo la tasa de deserción, además de preparar estudiantes que contarán con la preparación necesaria y de calidad para representar a la Institución en su vida laboral. Asimismo, de ser efectiva la aplicación de las estrategias aquí propuestas, la IUPG puede incentivar a otras Instituciones de Educación Superior a implementar cambios que no sólo mejoren su sistema educativo sino el de todo el país.

REFERENCIAS

- [1] J. W. Forrester, *World Dynamics*, Wright-Allen Press, 1971.
- [2] J. W. Forrester, «System Dynamics in the elevator,» 22, 4. 1997.
- [3] J. Forrester, *Industrial Dynamics*, Cambridge, England: Wright-Allen Press., 1961.
- [4] J. W. Forrester, *Urban Dynamics*, M.I.T. Press, 1969.
- [5] J. D. Sterman, *Bussines Dinamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw Hill, 2000.
- [6] Ministerio de Educación Nacional, «Manual de implementación,» Bogotá, 2010.
- [7] Politécnico Grancolombiano, «Malla curricular del Programa de Ingeniería de Sistemas,» 2020. Recuperado: <https://www.poli.edu.co/profesional/ingenieria-de-sistemas-bogota>
- [8] ICFES, «Informe Nacional de Resultados del Examen Saber 11 2019,» 2020. Recuperado: <https://www.icfes.gov.co/documents/20143/1711757/Informe+nacional+de+resultados+Saber+11-2019.pdf/01cca382-1f24-aefd-a3ef-0d04d2e6108d?version=1.0&t=1608776793757&download=true>
- [9] J. Song, M.-g. Zhang, F. Zheng y F.-c. Chen, «Dynamic simulation of the group behavior under fire accidents based on systems dynamics,» *Procedia Engineering*, vol. 211, pp. 635-643, 2018.
- [10] H. Susanto, U. Asfari y I. Muhandhis, «Development of System Dynamics Model to Increase Salt Fulfillment Ratio,» *Procedia Computer Science*, vol. 161, pp. 867-875, 2019.
- [11] C. Thaller, F. Niemann, B. Dahmen, U. Clausen y B. Leerkamp, «Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics,» *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 1075-1094, 2017.
- [12] S. Ruutu, H. Auvinen, . A. Tuominen, T. Ahlqvist y . J. Oksanen, «Simulation of transitions towards emission-free urban transport,» de *31st International Conference of the System Dynamics Society*, Cambridge, 2013.
- [13] M. McGregor, A. Nielsen, C. Chung, M. Fillery, . W. Wakeland y S. Mior, «System Dynamics to Investigate Opioid Use and Chiropractic Care for Chronic Musculoskeletal Pain,» *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 42, n° 4, pp. 237-246, 2018.
- [14] J. Fernandez, V. Pimentel, J. Barbancho y A. Luque, «System dynamics modelling approach in Health Sciences. Application to the regulation of the cardiovascular function,» *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 15, 2019.
- [15] G. Galal, I. El-Adaway y C. Gagli, «A System Dynamics Approach for Study of Population Growth and The Residential Housing Market in the US,» *Procedia Computer Science*, vol. 168, p. 154-160, 2020.
- [16] D. Borentein y L. M. Strauss, «A System Dynamics Model for Long-Term Planning of the Undergraduate Education in Brazil,» *The International Journal of Higher Education and Educational Planning*, vol. 69, n° 3, pp. 375-397, 2015.
- [17] Politécnico Grancolombiano, «Política de privacidad,» 2020. Recuperado: <https://www.poli.edu.co/politicadeprivacidadtyc>
- [18] OECD, «PISA 2018 Insights and Interpretations,» 2019. Recuperado: <https://www.oecd.org/pisa/PISA%202018%20Insights%20and%20Interpretations%20FINAL%20PDF.pdf>

Protocolo para el cálculo científico distribuido sobre clientes móviles indeterminados en una Mobile Ad hoc Networks MANET

Pablo Iuliano¹

Luis Marrone²

Fernando Tinetti³

Universidad Nacional de La Plata
Argentina

En este trabajo se propone el diseño de un protocolo que combina un enfoque para gestionar la indeterminación de clientes al momento de comenzar un cálculo científico distribuido basado en un diseño *cross layer*, con un mecanismo que agrupa los dispositivos presentes en una red móvil *ad hoc* o Mobile Ad hoc Networks MANET en clústeres, aprovechando la heterogeneidad inherente a este tipo de redes a fin de determinar que dispositivos serán los líderes de los agrupamientos conformados. La propuesta de solución implementada se basa en el protocolo de enrutamiento reactivo Ad hoc On-demand Distance Vector AODV, que modifica los formatos de mensajes para dar soporte a toda la nueva funcionalidad.

¹ Contacto: piuliano@info.unlp.edu.ar

² Contacto: lmarrone@linti.unlp.edu.ar

³ Contacto: fernando@lidi.info.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología *wireless* en los últimos años ha experimentado una expansión sin precedentes, llegando hasta el lugar más recóndito de la tierra. La tecnología inalámbrica permite la creación de redes sin la necesidad de cables, dando al usuario de este tipo de redes la libertad de moverse por su entorno sin la restricción de movilidad asociada a tener una conexión cableada.

De acuerdo al criterio dominante actualmente este tipo de redes tienden a ser centralizadas en torno a un dispositivo inalámbrico estacionario el cual ofrece el servicio de acceso a la red, sumado en la mayoría de los casos el acceso a internet.

Sin embargo, los dispositivos de computación móviles continúan reduciendo sus precios e incrementando sus capacidades de cómputo; volviéndose cada vez más interesantes como alternativa barata de computación distribuida para cálculos científicos, sumado al hecho que los bajos precios han popularizado la computación móvil y en ese sentido la exploración en cuanto a la posibilidad de conformar una red móvil ad hoc o Mobile Ad hoc Networks MANET a gran escala destinadas al cómputo científico se está convirtiendo plausible.

Cuando el objetivo de una investigación científica es obtener información válida de algún entorno con el cual se interactúa, la mayoría de las veces es prácticamente imposible establecer vínculos fijos permanentes, en otras palabras, enlaces cableados normales o enlaces inalámbricos centralizados entorno a un dispositivo estacionario. Para estos escenarios existe una nueva tecnología, basada en un nuevo paradigma de los sistemas de comunicación, que han venido a denominarse red móvil ad hoc o MANET.

2. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se describirá el marco conceptual sobre el cual se apoya y está construida la propuesta que aquí se presenta.

2.1 Redes móviles Ad Hoc

Formalmente las redes móviles ad hoc se pueden definir como sistemas autónomos de nodos móviles con capacidades de enrutamiento y conectados a través de enlaces inalámbricos formando un grafo de comunicación arbitrario (Figura 1). Con respecto al modelo de referencia TCP/IP, las redes móviles ad hoc definen una capa adicional entre la capa de red y las tecnologías inalámbricas subyacentes (Tabla 1). Esta capa es necesaria debido a que este tipo de redes deben mantener un solo dominio de difusión en entornos donde la visibilidad del nodo está limitada por el rango de transmisión de la interfaz inalámbrica.

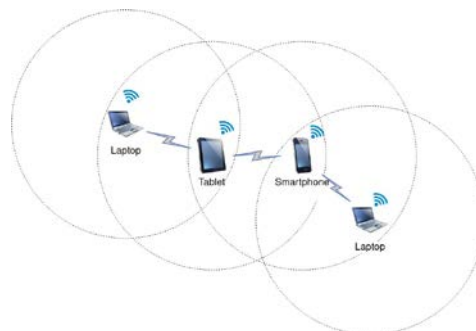


Figura 1. Esquema simplificado de una red móvil ad hoc

Tabla 1. Modelo de referencia TCP/IP para MANETs

Capa de Aplicación	Http, Https, FTP, SNMP, etc.
Capa de Transporte	TCP, UDP
Capa de Internet	IP
Capa de Ad Hoc	AODV, DSR, BATMAN, etc.
	Capa de Física

En este tipo de redes la topología varía dinámica y libremente a medida que los nodos se van desplazando por su entorno. Básicamente el modo de operación de este tipo de redes es *peer-to-peer multihop*, donde los paquetes de información son transmitidos de manera de almacenamiento y reenvío desde un origen a un destino arbitrario pudiendo involucran varios o ningún intermediario para alcanzar al destino.

Los patrones de movilidad de los nodos que componen las MANET generalmente son diferentes entre sí; con lo cual se presentarán nodos con gran movilidad, mientras otros tendrán características mayoritariamente estacionarias; complicando la tarea de predecir patrones de movimiento de los dispositivos que conforman este tipo de redes. Dentro de las MANET el enrutamiento de paquetes que es soportado de manera distribuida y la falla de un solo dispositivo no debería afectarlo significativamente.

Las problemáticas asociadas a las cuestiones energéticas deben ser consideradas debido a que, muchos o todos los nodos que componen las redes móviles ad hoc utilizan baterías o alguna otra forma de alimentación agotable. Con lo cual para este tipo de nodo se debe considerar que tengan presentes medias de preservación de la energía. El ancho de banda es un problema que está presente en todos los tipos de redes actuales y particularmente en las MANET en donde se hace más evidente esta problemática. Con lo cual el Throughput real es menor que la tasa máxima de transmisión de los canales de radio, esta merma radica por efecto del multihop, el ruido ambiental, la atenuación, etc.

2.2 Protocolos de enrutamiento para MANETs

En las redes móviles ad hoc, tanto la topología y los estados de los enlaces entre los dispositivos que la componen son dos propiedades que son impredecibles y que constantemente se van modificando, conllevando a que la eficiencia de las técnicas antes descritas de vea seriamente degradada. Como consecuencia directa de esta última contrariedad se han desarrollado varios protocolos de ruteos específicos para este tipo de redes y caen dentro de una de estas tres categorías [1]:

1. Los protocolos proactivos mantienen la información de enrutamiento incluso antes de que se necesite. Todos y cada uno de los nodos en la red mantienen información de las rutas hacia todos los demás nodos de la red. La información de las rutas se mantiene en las tablas de enrutamiento y se actualizan periódicamente a medida que cambia la topología de la red. Las actualizaciones generan una excesiva sobrecarga en la red debido a los cambios frecuentes en las rutas por lo dinámico de este tipo de redes y el ancho de banda limitado que esta posee.
2. Los protocolos reactivos no mantienen información o generan actividad de ruteo en los nodos de la red si no es necesario establecer comunicación entre ellos. Un nodo al enviar un paquete a un destino, provoca que se busque la ruta y se establezca la conexión. El procedimiento anterior es realizado a demanda. El descubrimiento de ruta por lo general se produce inundando toda la red con paquetes de petición de ruta. Estos protocolos experimentan cierto retardo asociado a la búsqueda de las rutas o porque las rutas pueden no ser válidas durante el tiempo suficiente. Por otro lado, utilizar eficientemente el ancho de banda y el consumo de energía, debido a que busca las rutas sólo cuando se necesitan.
3. Los protocolos híbridos son derivación de los dos primeros, combinan técnicas de los protocolos proactivos y de los protocolos reactivos.

2.3 Ad hoc On-demand Distance Vector AODV

AODV es un protocolo de ruteo reactivo para redes móviles ad hoc basado en vector distancias que funciona bajo demanda [2, 3]. Solo comienza el descubrimiento de rutas cuando es requerido y además las rutas se almacenan en tablas de ruteo. Estas últimas son mantenidas y almacenadas en cada nodo de la red. Debido a que las rutas se crean únicamente cuando son requeridas seminimiza el consumo de ancho de banda, la latencia de transmisión y el consumo de energía.

Las tablas AODV guardan información solo de las rutas hacia los destinos con los cuales se mantiene comunicación, lo cual genera poca sobrecarga en la red y las rutas se descubren a medida que se necesitan.

AODV soporta tres tipos de transmisión: unicast, multicast y broadcast; no obstante, AODV descubre las rutas basándose en peticiones *broadcasty* las respuestas son enviadas en modo unicast [4]. Inicialmente la tabla de ruteo solamente contiene entradas para los nodos vecinos.

Si un origen necesita alcanzar un destino que no es vecino, debe obtener una ruta que le indique como hacerlo. Para ello, el nodo origen envía por *broadcast* mensajes de descubrimiento de ruta RREQ.

En la Tabla 2 se muestran los campos que componen dicho mensaje. Si un nodo que no es el destino recibe este paquete, verifica los números de secuencia a fin de determinar si lo ha recibido previamente. En caso de que no lo haya recibido, lo reenvía incrementando el número de saltos y crea el camino inverso para la respuesta RREP, en la Tabla 3 se muestran los campos del mensaje RREP.

Tabla 2. Formato del paquete RREQ de AODV [2]

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Originator IP Address							
Originator Sequence Number							

Tabla 3. Formato del paquete RREP de AODV [2]

Type	R	A	Reserved	Prefix Size	Hop Count
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Originator IP Address					
Lifetime					

La respuesta del establecimiento de ruta RREP es generada por los nodos intermedios que cuentan con una ruta hacia el destino o el mismo destino una vez que el mensaje RREQ le haya llegado. Los nodos envían estas respuestas RREP al resto que le habían enviado el mensaje RREQ. La ruta se confirma una vez que el RREP llega al origen que había comenzado con el descubrimiento de ruta.

Es necesario mantener el enlace activo entre el origen-destino después de establecerse una ruta, ya que ésta se mantiene válida durante un periodo de tiempo. Si los nodos que tienen rutas activas realizan envíos periódicos de mensajes RREP ajustando a 1 el TTL, es decir, mediante la difusión local del mensaje a solo los dispositivos situados a 1 salto de distancia este objetivo se asegura.

Otro mecanismo adicional para garantizar la validez de las rutas consiste en enviar periódicamente mensajes HELLO entre los nodos vecinos a fin de determinar si se encuentran activos en ese instante en la red, mantener actualizadas las tablas de rutas y conservar la conectividad entre ellos, aunque para reducir el volumen de estos mensajes solo debe permitirse su envío a los nodos que estén transmitiendo datos.

Si luego de algún tiempo no se reciben mensajes HELLO desde un vecino, se supone que este ya no está disponible, por lo que se desecha la ruta y se borra de la tabla.

De esta forma, cuando un nodo detecta la ausencia de un vecino mediante los mensajes HELLO o se produce un error de envío, se origina un mensaje Route Error RERR, que se emplea para invalidar una ruta, cuyos campos se muestran en la Tabla 4. De modo que, el mensaje RERR llegará hasta el origen de la ruta y este decidirá o no si da comienzo nuevamente al proceso de descubrimiento de ruta.

Tabla 4. Formato del paquete RERR de AODV [2]

Type	N	Reserved	Dest Count
Unreachable Destination IP Address			
Unreachable Destination Sequence Number			
Additional Unreachable Destination IP Address			
Additional Unreachable Destination Sequence Number			

2.4 Clustering en MANET

El proceso mediante el cual se divide una red en subestructuras interconectadas se denomina agrupamiento o clustering y las subestructuras resultantes se las denomina grupos lógicos o clústeres. En estos escenarios los nodos de la red son divididos y ubicados dentro de grupos lógicos. Una estructura típica de clústeres es la que se muestra en la Figura 2.

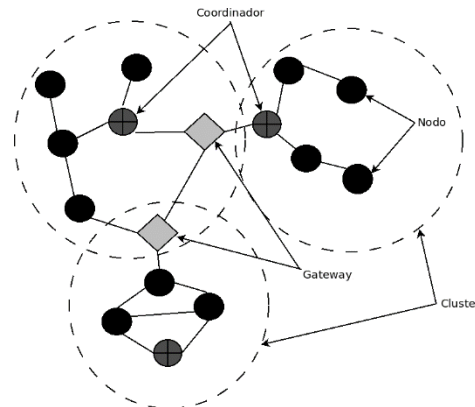


Figura 2. Ejemplo de una red dividida en clústeres

Los nodos normalmente en este tipo de esquemas asumen roles diferentes, como cabeza o coordinador, *gateway* o simplemente miembro del agrupamiento lógico. Los coordinadores mantienen y administran toda la actividad dentro del clúster al que pertenecen. Un nodo *gateway* se encarga de toda la comunicación entre clústeres. Hay esquemas donde estos últimos tipos son omitidos y por lo tanto no existe la diferenciación entre tráfico intra del inter clúster. Una topología dividida en clúster mejora la performance de una MANET y los beneficios son enumerados a continuación:

- Reduce la información topológica debido a que como el número de nodos dentro de un clúster es menor al número total de nodos de la red, se simplifica el proceso de incorporar nueva información de la topología. De esta manera cada nodo solo requiere almacenar una porción reducida de la información de ruteo de toda la red.
- Eficiencia en el ruteo, como en una arquitectura de red plana cada nodo tiene igual responsabilidad en el proceso de enrutamiento, una gran cantidad de paquetes inundan la red durante el proceso de descubrimientos de rutas. La división de la red en grupos lógicos mejora la eficiencia y hace que el descubrimiento de rutas sea más sencillo.
- Escalabilidad. Desde la perspectiva de un nodo que compone a una MANET la red aparenta ser más pequeña y si un nodo se desconecta o cambia de grupo debido a la movilidad solamente los nodos restantes del grupo deben modificar sus estructuras de datos.

Existen otras ventajas resultantes del clustering como el mejor aprovechamiento del ancho de banda, el consumo de energía y el rendimiento también se mejoran.

2.5 Diseño Cross Layer

Históricamente las arquitecturas de red asumen que las funciones de comunicación están organizadas en capas y la entrega de paquetes son llevadas a cabo por protocolos que operan en distintas capas [5]. De esta manera las funcionalidades de la red en su conjunto son llevadas a cabo a través del modelo en capas. Así cada una de estas define un aspecto particular de la operatoria de la red del cual se encargará de resolver y proveer servicios a la capa inmediatamente superior. Otra característica de las capas dentro de este modelo es que son modulares y cada una de ellas implementa una tarea en específica.

La arquitectura en capas prohíbe la comunicación directa entre capas no adyacentes, mientras que la comunicación entre las adyacentes funciona gracias a la utilización de interfaces preestablecidas y estandarizadas [6].

Alternativamente, existen protocolos que son diseñados explícitamente para ignorar la arquitectura en capas, permitiendo la interacción e intercambio de datos entre capas que no se encuentran dispuestas en forma adyacentes. Este tipo de diseño se utiliza para obtener mejores prestaciones cuando se construyen nuevas soluciones en particular con los nuevos protocolos de enrutamiento [7, 8].

En la Figura 3 se puede apreciar la arquitectura en capas y el diseño *cross layer* que permite la interacción e intercambio de datos entre capas no adyacentes, por ejemplo, en el diseño *cross layer* es posible que parámetros de la capa de aplicación puedan tener comunicación directa con la capa de enlace. Bajo el enfoque *cross layer*, una capa puede adaptarse a los requerimientos y condiciones particulares de las otras.

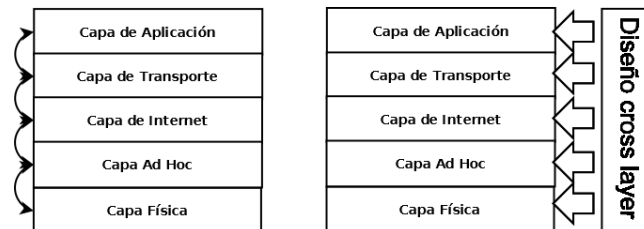


Figura 3. Arquitectura en capas y el diseño *cross layer*

La motivación para adoptar un diseño *cross layer* en un protocolo que opere en una MANET se puede fundamentar principalmente en tres tópicos: Soportar la necesidad de que sea adaptable a las condiciones dinámicas de este tipo particular de red, satisfacer requisitos específicos del ámbito de aplicación y atender restricciones en cuanto al consumo de energía que debe alcanzar la solución a desarrollar.

- *Adaptabilidad y auto-organización.* Los protocolos de red que funcionan sobre MANETs deben ser adaptables a las condiciones volátiles de conectividad que este tipo de red presenta debido a la movilidad de los dispositivos que la conforman y todo este nivel de detalle debe ser transparente para las capas superiores. De este modo los nodos en estos sistemas dinámicos experimentan una serie de condiciones, dentro de las cuales se incluyen: cambios frecuentes en la topología, diferentes patrones en el tráfico y las distribuciones de los nodos, entre otras. La adaptabilidad puede ser implementada de la siguiente manera:

1. Conciencia del contexto o *context awareness*: Poseer conocimiento de los factores que afectan al estado de la red (condición del canal, congestión, demandas de tráfico, etc.).
2. Ajuste del protocolo: Tener la posibilidad de que cada protocolo ajuste su comportamiento de acuerdo al estado actual de la red.

Un ejemplo de esto son los protocolos de enrutamiento que toman decisiones durante su funcionamiento de acuerdo al estado del contexto, un parámetro comúnmente utilizado para ajustar su comportamiento son los niveles de energía presentes en los nodos componentes del sistema [9]. El *context awareness* en la mayoría de las ocasiones requiere practicar un rediseño de la manera en que los protocolos interactúan entre sí. Los diseños *cross layers* garantizan que los protocolos cooperen compartiendo información del estado de la red mientras se mantiene la separación en capas [10].

- *Conservación del uso de la energía.* El manejo eficiente de la energía es un factor determinante para que una solución que funciona sobre redes móviles ad hoc sea exitosa o no. Esto se debe a que los nodos que componen este tipo de redes dependen de fuentes de energía portátiles y limitadas. De hecho, la conservación de la energía se convierte en un reto crucial y extremadamente difícil de lograr en entornos multi-hop, donde los nodos deben destinar parte de su energía para el enrutamiento de paquetes y garantizar de esta manera la conectividad de la red.

En la capa de red, por ejemplo, el proceso de selección de ruta debe ser realizado de tal manera que se reduzca el consumo de energía involucrado en el ruteo de extremo a extremo [11]. Para que esto sea posible el protocolo de enrutamiento debe tener acceso a la información de la energía involucrada en la retransmisión de paquetes y el nivel de batería del dispositivo.

- Requisitos específicos del ámbito de aplicación o QoS *Quality of Service*. QoS es una garantía de cierta performance en términos de los siguientes parámetros: el uso del ancho de banda, la demora de entrega de paquetes, el jitter o la tasa de entrega de paquete, etc. Generalmente, el diseño cross layer permite que las capas intercambien información de estado para obtener ganancias de rendimiento en términos de los parámetros antes enumerados [12].

3. MÉTODO

En este documento se propone una arquitectura de cómputo distribuido para redes móviles ad hoc, donde partimos de la premisa de la existencia de ciertos dispositivos con capacidades superiores que participan de la MANET que contendrán algunos de ellos una cola de pedidos de procesamiento, los coordinadores, donde cada pedido de procesamiento se resolverá en forma conjunta y colaborativamente. Para esto, se definirán grupos lógicos o clústeres de nodos dentro de los que se circunscribirá la asignación de tareas para la resolución de cada pedido de procesamiento.

Cada solicitud deberá declarar a priori el tipo de problema que se debe resolver de las posibles opciones que ofrece el sistema y el conjunto de datos a ser utilizados; tanto los posibles procedimientos computacionales como los datos a ser seleccionados por un eventual pedido, se encuentran almacenados en cada nodo de la red o al menos estos tienen indicado a donde ir a buscarlos.

El modelo propuesto descansa sobre la idea de no tener un coordinador centralizado, para optar por organizarse dinámicamente en clústeres agrupando los dispositivos alrededor de un coordinador o líder de grupo, para proveer los recursos necesarios para que cada pedido de las distintas colas pueda ser atendido.

Las agrupaciones de dispositivos son dinámicamente creadas, desagrupadas y vuelven a crear según se necesite. Las componentes de estos grupos son aquellas unidades de red a las cuales el coordinador del clúster las enroló primero, pudiéndose pensar que el criterio subyacente de conformación de grupos es por cercanía geográfica, o expresado de otra manera, los nodos que se ubican lo más próximos unos de otros pertenecerán al mismo clúster, aunque esto no es necesariamente cierto.

Si la topología de red y la carga de trabajo de los nodos se mantienen invariantes al momento de haber sido incorporados al clúster y como la política de enrolamiento es el primero que responde es mi coordinador se obtendría una reducción de los costos asociados a la latencia y la comunicación. Esta política de conformación de grupos de dispositivos en la MANET no implica de ningún modo que todos los nodos se encuentren a un single-hop de distancia unos de otros, con lo cual podría presentarse el escenario donde paquetes generados en un origen deban atravesar varios nodos intermedios hasta alcanzar el destino en el afán de establecer comunicación entre ambos extremos.

El diseño propuesto combina el enfoque basado en clústeres con uno de tipo cross layer. Esta combinación tiene como propósito involucrar el descubrimiento de nuevos clientes o agentes en el proceso de encaminamiento. Estos últimos junto al coordinador son los que dan el soporte al cómputo distribuido colaborativo. El protocolo propuesto se denomina PROCCDIMI, el cual establece la creación de clústeres dinámicamente distribuidos, donde el envío de mensajes relacionados con el cómputo únicamente se circunscribe al clúster. Esta última cualidad tiene por objetivo de optimizar el consumo de energía, memoria, potencia de cómputo y ancho de banda, gracias al uso eficiente de recursos.

PROCCDIMI implementa un balanceo de cargas dinámico basándose en multi-agentes y se fundamenta en los protocolos de enrutamiento de vector distancia de MANETs, particularmente en AODV [2]. También se contempla la heterogeneidad existente en este tipo de redes y es por ello que se incorpora la idea en esta propuesta de aprovechar la existencia de algunos dispositivos que poseen capacidades superiores (cómputo, comunicación y energía) con el objetivo de ser elegidos como los líderes de los clústeres, o en este caso como coordinadores del cómputo distribuido, a fin de llevar a cabo la conformación del grupo, la asignación de tareas dentro del mismo y realizar el proceso de descubrimiento de nuevos clientes. Por ello es necesario distinguir entre dispositivos con capacidades superiores y dispositivos con capacidades reducidas. Una vez hecha la distinción, es posible una clasificación en base a sus capacidades.

Las capacidades de los dispositivos se obtienen a partir del hardware que ellos mismos poseen, es decir, inicialmente un dispositivo conoce sus propias características respecto a la cantidad de memoria, energía, capacidad de cómputo y potencia de señal; por lo tanto, la capacidad de un dispositivo se asigna en función del tipo de dispositivo que se trata.

El criterio para la elección de coordinador del clúster se basa en la selección de los dispositivos con capacidades superiores, en este caso la capacidad de un dispositivo se determina por medio de una estrategia sencilla que asigna un identificador binario a cada dispositivo; es decir, si se trata de un dispositivo con capacidades superiores es un DCS, de lo contrario es un DCL [13].

Para definir la capacidad de un dispositivo se tiene en cuenta las siguientes suposiciones, cada dispositivo es consciente del grado de la capacidad que posee y este puede ser solo de dos tipos: alta (DCS) o limitada (DCL). En PROCCDIMI los nodos que son líderes de clústeres son todos ellos DCS, no implicando que el recíproco sea siempre verdadero.

3.1 Formatos de paquetes utilizados por PROCCDIMI

Las extensiones que presentan los formatos de mensajes de PROCCDIMI usan el formato TLV (*Type-Length-Value*) de tipos de 8-bits que siguen los lineamientos que se presentan en el Internet-Draft de AODV [14]. Es decir, las extensiones de los campos deben definirse primero por un *Type* indicando a qué tipo de datos pertenece el valor almacenado en el campo. Luego el *Length* que guarda la longitud de la extensión y por último *Value* que es el valor del campo.

3.1.1 Formatos de paquetes para el descubrimiento de clientes

A continuación, se describen los formatos utilizados para construir los paquetes que se intercambiarán durante el proceso de descubrimiento de clientes y de enrutamiento que se realizan de forma simultánea:

- *Formato del paquete Coordinador Request CREQ*. PROCCDIMI clasifica a los dispositivos de la red según si poseen capacidades superiores o limitadas de acuerdo al nivel de recursos con los que cuenta. Esta discriminación tiene por función la de proveer de una métrica para que el coordinador sepa con qué tipo de dispositivo cuenta a la hora de encarar un cómputo distribuido. De este modo, el coordinador tendrá un medio que le permitirá lograr un efectivo balanceo de cargas dentro del clúster. A tal efecto, PROCCDIMI añade un nuevo campo a los paquetes RREQ extendidos de AODV, el campo *Nodo Coeficiente*. Con lo cual a estos nuevos paquetes se los denominarán *Coordinador Request CREQ* a partir de ahora. El campo *Nodo Coeficiente* va acompañado de los correspondientes campos *Type* y *Length* siguiendo las recomendaciones del Internet-Draft de AODV.

El campo *Nodo Coeficiente* también se encuentra presente en la tabla de clientes que cada coordinador lleva localmente.

Otro campo que se agrega al RREQ de AODV es *Cluster ID Origen* también haciendo uso del formato TLV. La función de *Cluster ID Origen* es una vez que se generó la respuesta para el emisor del RREQ con los datos del cluster al que pertenecerá a partir de la recepción de la misma, no se generen respuestas duplicadas o innecesarias.

Este campo ayuda a mantener la sobrecarga de la red asociada al enrutamiento bajo control. El formato del mensaje CREQ que se observa en la Tabla 5 tiene por propósito llevar una petición a fin de lograr que al nodo solicitante se le identifique cuál será su clúster de pertenencia junto con el coordinador que lo administra. Al mismo tiempo que mantiene su objetivo original que es el descubrimiento de rutas a los posibles destinos.

Un mensaje puede pasar por varios nodos intermedios antes de alcanzar el nodo destino, y es por ello que en el paquete CREQ se transportan datos de control útiles para la retransmisión de mensajes por parte de los nodos intermedios y para el envío de vuelta de la respuesta.

Tabla 5. Formato del paquete CREQ

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Originator IP Address							
Originator Sequence Number							
NodoCoefType	NodoCoefLength			Nodo Coeficiente			
CIIDType	CIIDLength			Cluster ID Origen			

El formato de mensaje que se está presentando en este apartado contiene los siguientes campos cabecera: *Type* es el tipo de dato. *J* es la *Join flag*, reservado para multicast. *R* es la *Repair flag*, reservado para multicast. *G* es el *Gratuitous RREP flag*, indica si se debe enviar un *gratuitous RREP* en modo unicast al nodo indicado en el campo dirección IP destino. *D* es la bandera de destino, se indica solo cuando el destino puede responder el CREQ actual. *U* es un flag que indica que el número de secuencia es desconocido. *Reserved* se envía como 0, ignorado en recepción. *Hop Count* es el número de saltos desde la dirección IP origen al nodo que gestiona la petición. *RREQ ID* es un número de secuencia que identifica únicamente el CREQ cuando es tomado en conjunto con la dirección IP del nodo origen. *Destination IP Address* es la dirección IP del destino para la ruta deseada. *Destination Sequence Number* es el último número de secuencia recibido en el pasado por el origen para cualquier ruta hacia el destino. *Originator IP Address* es la dirección IP del nodo que origina el CREQ. *Originator Sequence Number* es el número actual de secuencia del origen. *NodoCoefType* es el tipo de dato y *NodoCoefLength* es la longitud de *Nodo Coeficiente*. El campo *Nodo Coeficiente* almacena si el emisor es: DCS o DCL. *CIIDType* es el tipo de dato y *CIIDLength* es la longitud de *Cluster ID Origen*. Finalmente, *Cluster ID Origen* es el que indica si al momento de recepción de este paquete un nodo anterior generó una respuesta con los datos de afiliación de un grupo lógico.

- Formato del paquete Coordinador Reply CREP. El formato de mensaje CREP (*Coordinador Reply*) ilustrado en la Tabla 6 tiene un propósito dual, en primer lugar, comunicar la ruta hacia el destino del mensaje CREQ que genera la respuesta encapsulada en el paquete CREP y en segundo término llevar la información referente a la respuesta de la petición de coordinador. Este paquete puede ser generado por el coordinador del clúster, el destino del CREQ o un nodo intermedio entre el origen y el destino, que esté en condiciones de responder una o las interrogantes planteadas por el mensaje CREQ que requieren respuesta. Esta decisión responde a mantener la sobrecarga de enrutamiento lo más reducida posible.

Tabla 6. Formato del paquete CREP

Type	R	A	Reserved	Prefix Size	Hop Count
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Originator IP Address					
Lifetime					
CIIDType	CIIDLength			Cluster ID	
IPCoordType	IPCoordLength		Coordinador IP Address		
			IPMCType	IPMCLength	
IPMulticastCluster					

El paquete CREP contiene los siguientes campos de cabecera: *Type* es el tipo de dato. *R* es la *Repair flag*, usado para multicast. *A* cuando se requiere un mensaje de *Acknowledgment* o reconocimiento de peticiones y se activa cuando se quiere comprobar si un enlace es unidireccional. *Reserved* si se envía 0, se ignora cuándo es recibido. *Prefix Size* si no es cero, este prefijo especifica que el siguiente salto puede ser usado por cualquier nodo con el mismo prefijo de encaminamiento. *Hop Count* es el número de saltos desde la dirección IP del origen hasta la dirección IP del destino. *Destination IP Address* es la dirección IP del destino. *Destination Sequence Number* es el número de secuencia del destino asociado a la ruta. *Originator IP Address* es la dirección IP del nodo que ha originado el CREQ. *Lifetime* es el tiempo en milisegundos de los que los nodos reciben el CREP considerando que la ruta es válida. *CIIDType* es el tipo de dato y *CIIDLength* es la longitud de *Cluster ID*. *Cluster ID* es el campo que almacena el ID del clúster al cual pertenecerá el destino del CREP. Otros campos del paquete destinados a guardar información de

clustering son: *IPCoordType*, *IPCoordLength* y *Coordinador IP Address* los cuales sirven para transportar la IP del coordinador del cluster al que se agregará el destino. *IPMCType* es el tipo de dato y *IPMCLength* es la longitud de *IPMulticastCluster*. Por último, *IPMulticastCluster* es el campo que maneja el coordinador para indicar cuál va a ser la dirección IP multicast que se utilizará para realizar anuncios globales dentro del clúster y así eliminar la necesidad de utilizar envío de mensajes de broadcast para realizar este tipo de comunicaciones.

- *Formato del paquete Route Error RERR*. El formato de mensaje RERR mostrado en la Tabla 4 es otro de los paquetes usados por PROCCDIMI, pero este se utiliza tal cual es propuesto por AODV, es decir, no se ha añadido ningún campo extra, por lo que se conserva y se utiliza igual a como se lo emplea AODV.

3.1.2 Formatos de mensajes del cómputo de distribuido

A continuación, se describen los formatos utilizados para construir los paquetes que se intercambiarán durante el proceso de asignación de tareas a los clientes y la posterior recuperación de los resultados de las ejecuciones de las mismas.

- *Formato del paquete Calculation Distributed Request CDREQ*. PROCCDIMI, al igual que en el caso de los CREQ, añade un campo a los mensajes RREQ de AODV, el campo *Task Number*, los cuales a partir de ahora se denominarán Calculation Distributed Request CDREQ. El campo *Task Number* es definido siguiendo el formato TLV de tipos de 8-bits y por lo tanto es acompañado por: *TNType* es el tipo de dato de *Task Number*, *TNLength* es la longitud de *Task Number* y *Task Number* es el campo para la identificación de cual tarea debe resolver el cliente.

La extensión *Task Number* cumple con la función de indicarles a los clientes cual será la tarea que deberán realizar dentro de un nuevo cómputo científico distribuido. El formato del mensaje CDREQ que se observa en la Tabla 7 tiene como propósito llevar la petición del coordinador a los clientes indicándoles que formarán parte de un nuevo procesamiento colaborativo y que parte les corresponde resolver de este cómputo mancomunado que se desarrollará dentro del grupo.

Tabla 7. Formato del paquete CDREQ

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Originator IP Address							
Originator Sequence Number							
TNType	TNLength					Task Number	

- *Formato del paquete CDREP Calculation Distributed Reply*. El formato de mensaje CDREP ilustrado en la Tabla 8 tiene como propósito llevar el resultado del cálculo de la tarea encomendada al cliente en lo referente a la respuesta de la petición del coordinador CDREQ. Este paquete es generado por cada cliente una vez finalizada su ejecución y tiene como nodo destino el coordinador del clúster.

El paquete CDREP contiene los mismos campos de cabecera que RREP de AODV, con la incorporación del campo *TTNResult* que se utiliza para indicar el resultado del cálculo. También se adicionan los siguientes campos: *TNRType* es el tipo de dato de *TNRResult*. *TNRLength* es la longitud de *TNRResult*.

Tabla 8. Formato del paquete CDREP

Type	R	A	Reserved	Prefix Size	Hop Count
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Originator IP Address					
Lifetime					
TNRType	TNRLength				
Task Number Result					

3.2 Generación de los mensajes CREQ, CREP y RERR

Cuando un nuevo dispositivo ingresa a una MANET que funciona sobre PROCCDIMI y tiene intenciones de formar parte de un clúster abocado al cómputo distribuido, con el primer descubrimiento de ruta comienza el proceso de filiación a un clúster. Tanto el pedido de descubrimiento de ruta como el ingreso de un nodo a un clúster inicia con una solicitud CREQ y ambos pedidos se resuelven en forma simultánea.

El paquete CREQ posee un número de secuencia o campo RREQ ID que se incrementa cada vez que se genera un nuevo CREQ. El número de secuencia es utilizado para los nodos intermedios para decidir si reenvían el mensaje o lo descartan si es que ya lo han retransmitido anteriormente. El mensaje CREQ se envía por broadcast al vecindario dentro del clúster, como muestra la Figura 4. El mensaje CREQ lleva la dirección IP del nodo origen, junto con el campo Nodo Coeficiente que como se explicó, tiene por objetivo proveerle al coordinador de una métrica para que este pueda realizar un balance de cargas efectivo.

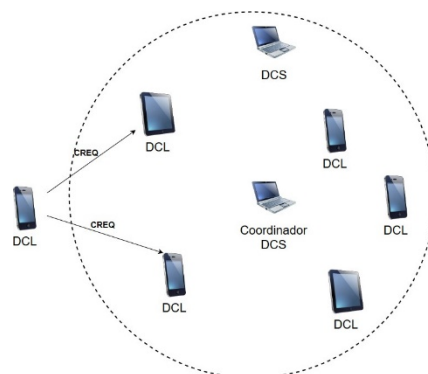


Figura 4. Envío broadcast de CREQ

En el momento que un nodo intermedio reenvía un CREQ, añade una ruta inversa en su tabla, esta ruta referencia hacia el nodo origen emisor del CREQ. Mientras el mensaje CREQ es recibido por nodos que no tienen una de las respuestas para las que fue generado, el paquete solamente es reenviado conforme al proceso descrito en las líneas superiores. A continuación, se analizarán los casos en que un dispositivo de la red está en condiciones de generar un mensaje CREP al origen:

- El nodo receptor es coordinador, la solicitud de descubrimiento de ruta es para alcanzarlo a él y el campo *Cluster ID Origen* del CREQ no tiene un valor válido. Cuando se dan estas condiciones el receptor responde las dos interrogantes para las cuales se creó el paquete CREQ devolviendo un mensaje CREP al origen que transita la ruta inversa por donde le ha llegado el mensaje CREQ. Además, en los campos *Cluster ID* y *Coordinador IP Address* se completan con el identificador del clúster del coordinador que recibió el paquete y la dirección IP del mismo respectivamente. El envío del CREP toma lugar posteriormente a que el coordinador receptor actualice su tabla de clientes agregando al nuevo integrante del clúster, el nodo emisor del CREQ. En la Figura 5 se grafica el escenario antes planteado.

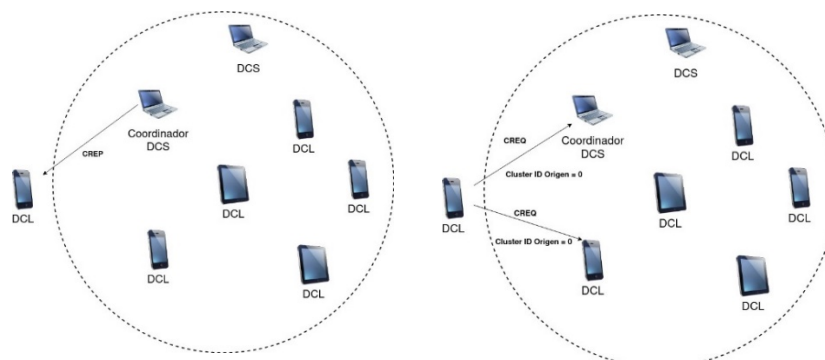


Figura 5. Respuesta CREP cuando el receptor es coordinador, es el destino del descubrimiento de ruta y no se ha respondido previamente con los datos de filiación a un clúster: a) envío broadcast de la solicitud CREQ conteniendo la información de clustering, b) Respuesta CREP vía unicast por la ruta reversa conteniendo la información de clustering

- El nodo receptor puede o no ser coordinador, la solicitud de descubrimiento de ruta es para alcanzarlo a él y el campo *Cluster ID Origen* del CREQ tiene un cluster ID válido. Lo que significa que el receptor solo debe responder por la información de ruteo solicitada. Ya que lo correspondiente al clustering ya fue resuelto por un nodo que recibió el CREQ en un estadio anterior. De este modo el destinatario devuelve un mensaje CREP al origen, a través de la ruta inversa por donde le ha llegado el mensaje CREQ. La Figura 6 muestra un ejemplo de lo descrito anteriormente.

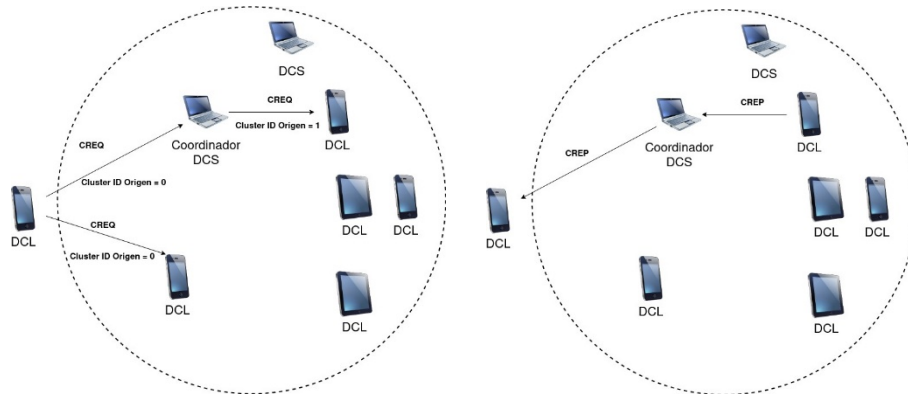


Figura 6. Respuesta CREP cuando el receptor es el destino del descubrimiento de ruta y la solicitud de clustering ya fue contestada: a) Envío broadcast del mensaje CREQ, b) Respuesta CREP que transporta solamente información de ruteo

- El nodo receptor no es coordinador, la solicitud de descubrimiento de ruta es para alcanzarlo a él y el campo *Cluster ID Origen* del CREQ no tiene un cluster ID válido. Bajo estas condiciones el receptor debe:
 - Responder por la información de ruteo solicitada del mismo modo que se explicó anteriormente.
 - Si el nodo receptor pertenece a un cluster entonces junto con la información de ruteo se completan los campos *Cluster ID* y *Coordinador IP Address* del paquete CREP, para luego reenviar el paquete CREQ con el campo *Cluster ID Origen* asignado al cluster ID del nodo receptor como se muestra en la Figura 7. Esto último tiene por objetivo que el coordinador de cluster del receptor actualice su tablade clientes con los datos del nodo emisor. Si el receptor no pertenece a ningún cluster solamente responde con un CREP con la información deruteo.

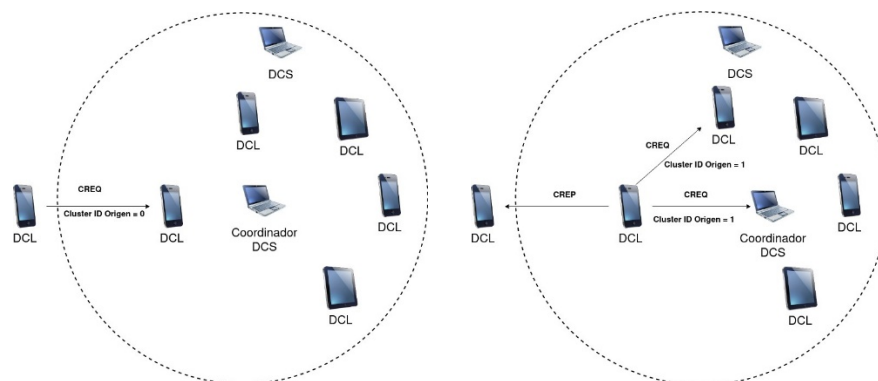


Figura 7. Respuesta CREP cuando el receptor no es coordinador, es el destino del descubrimiento de ruta y la solicitud de clustering no fue contestada aún: a) Broadcast del paquete CREQ, b) Respuesta CREP con la información de ruteo y clustering. Reenvío del CREQ con el campo Cluster ID Origen cargado con un cluster ID válido.

- El receptor es un coordinador intermedio y el campo *Cluster ID Origen* del CREQ no tiene un cluster ID válido. Bajo las condiciones anteriores, el coordinador receptor ingresa al emisor del CREQ a su tabla de clientes y genera un mensaje CREP conteniendo la información de clustering. Luego el nodo actualiza el campo *Cluster ID Origen* del CREQ con su cluster ID y finalmente lo reenvía como se puede ver en la Figura 8.

Otro escenario de generación de paquetes distinto a los antes enumerados, se produce cuando el receptor es un nodo coordinador intermedio y el campo *Cluster ID Origen* del CREQ tiene un clúster ID

válido. En este caso, como se muestra en la Figura 9 no se genera ninguna respuesta CREP y se procede a verificar que el clúster ID sea el mismo que del coordinador receptor. Si esto último ocurre entonces el coordinador actualiza la tabla de clientes agregando al nodo emisor del CREQ. Si resulta que el clúster ID no coincide con el del receptor entonces el paquete es reenviado.

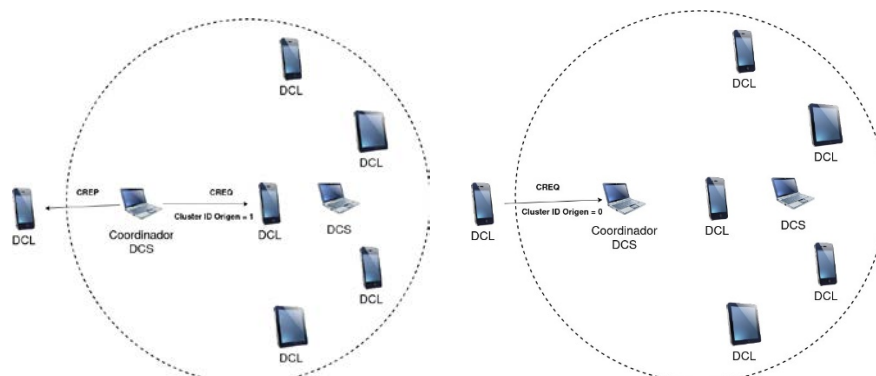


Figura 8. Respuesta CREP cuando el receptor es un coordinador intermedio y la solicitud de clustering no fue contestada aún: a) Solicitud CREQ por broadcast, b) Respuesta CREP con la información de clustering al origen y reenvío del CREQ con el fin que el coordinador actualice su tabla de clientes

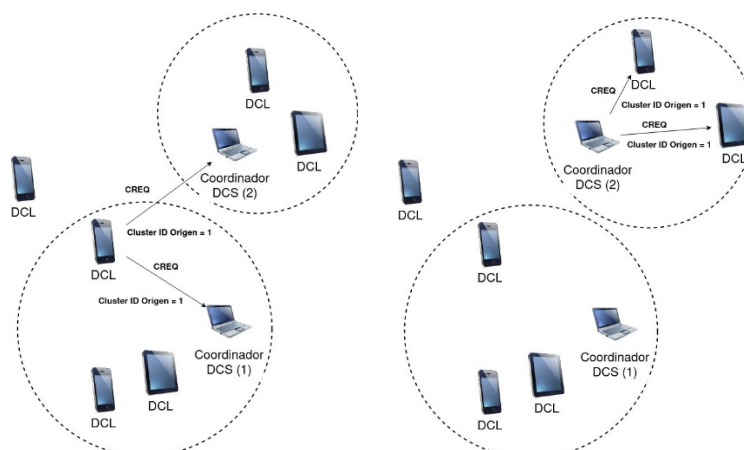


Figura 9. Respuesta CREP cuando el receptor es un coordinador intermedio y la solicitud de clustering ya fue contestada: a) Reenvío broadcast del CREQ a un coordinador con el mismo Cluster ID que el valor cargado en el Cluster ID Origen y a otro con distinto Cluster ID. b) Reenvío broadcast del paquete CREQ por el coordinador con distinto clúster ID

En las siguientes líneas se analiza los escenarios que podrían acontecer cuando un mensaje CREP generado por un origen dado pasa por un nodo intermedio en el camino al destino o directamente llega a destino:

- El nodo receptor es el destino y no tiene asignado clúster. En este caso si el CREP contiene información de la ruta y del clustering este se actualiza con ambas, caso contrario actualizará la información que sea provista por el mensaje, pudiendo ser está tanto la de la ruta o la del clúster y el coordinador.
- El nodo receptor es el destino y ya tiene asignado clúster, en este caso se actualiza la información de la ruta solamente y el resto se descarta.
- El receptor es un nodo intermedio y tiene asignado clúster de pertenencia, aquí solamente se actualiza la información de la ruta solamente y se reenvía el paquete.
- El receptor es un nodo intermedio y no tiene asignado clúster, en esta situación el receptor realiza las siguientes operaciones:
 1. Actualiza la información de la ruta.
 2. Reenvía el mensaje CREP.
 3. Si el mensaje CREP transporta información de clustering entonces el receptor genera un nuevo CREQ destinado al coordinador conteniendo en el campo *Cluster ID Origen* el cluster ID que transportado

por el mensaje CREP. La Figura 10 grafica la situación planteada en las líneas anteriores. En caso que el mensaje CREP no transporte información de clustering, no hace ninguna operación adicional.

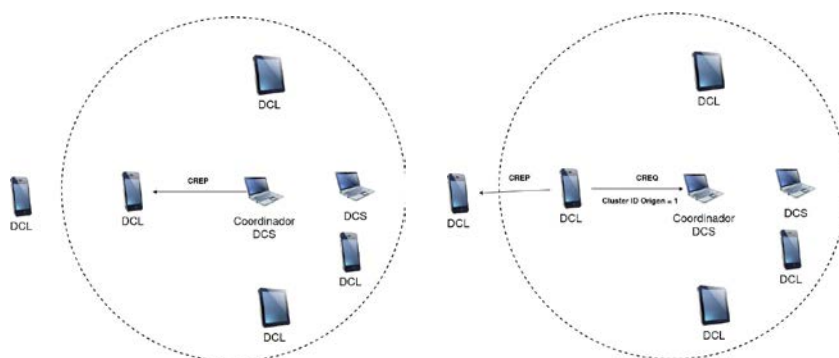


Figura 10. Respuesta CREP recibida por un nodo intermedio sin clúster asignado y el mensaje CREP transporta información de clustering: a) Respuesta CREP vía unicast, b) Reenvío del paquete CREP y generación de un nuevo CREQ con los datos del nodo intermedio

Una vez establecida una ruta entre ambos nodos, origen y destino, la ruta es válida solo durante un período de tiempo. Ese tiempo se encuentra registrado en el campo *lifetime*. El *lifetime* es el tiempo de expiración de la validez de la ruta y es necesario debido a la volatilidad de los enlaces en este tipo de redes, ya que más adelante esa ruta podría resultar no válida. El mantenimiento de las rutas sirve precisamente para resolver la situación antes descrita.

Si el origen que ha enviado el mensaje se mueve y como consecuencia modifica la topología, entonces debe reiniciar un nuevo proceso de descubrimiento de ruta. Por otro lado, si el nodo que se mueve es un nodo intermedio o se trata del destino (Figura 11), y existe algún mensaje dirigido a él, entonces el nodo que detecta el fallo genera un mensaje de error y lo envía al nodo que ha originado la comunicación. Este mensaje de error es denominado RERR y tiene como propósito invalidar una ruta. Todos los nodos intermedios por los que pasa el mensaje RERR, cancelan las rutas hacia el nodo que se ha vuelto inalcanzable. Una vez que el mensaje RERR llega a su destino, el origen decide dar por terminado el envío o volver a enviar un nuevo mensaje CREQ.

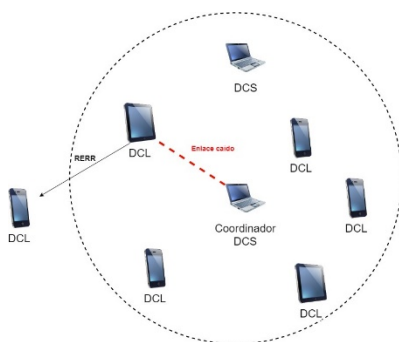


Figura 11. Enlace caído hacia el coordinador

3.3 Generación de los mensajes CDREQ, CDREP y RERR

Para comenzar con un nuevo cómputo distribuido sobre un clúster ubicado dentro de una MANET, el coordinador generará un paquete CDREQ para cada uno de los clientes que estarán involucrados al cálculo distribuido. El paquete CDREQ, al igual que en el caso anterior, posee un número de secuencia en el campo *RREQ ID*.

Los mensajes CDREQ se envían por unicast por el coordinador del clúster y este envía uno específico para cada cliente como se muestra en la Figura 12. Este mensaje contiene el campo *Task Number* cuya funcionalidad es indicarles a los clientes cual es la tarea que deben realizar dentro del cómputo científico distribuido. Cuando un mensaje CDREQ alcanza al destinatario, este inspecciona el campo *Task Number*, busca dentro de un catálogo de tareas cual es la que corresponde con el identificador almacenado en el

campo anterior, ejecuta la tarea que le fue asignada y devuelve un mensaje CDREP al origen con el resultado, a través de la ruta inversa por donde le ha llegado el mensaje CDREQ. En la Figura 13 se grafica el envío de los mensajes CDREP al coordinador.

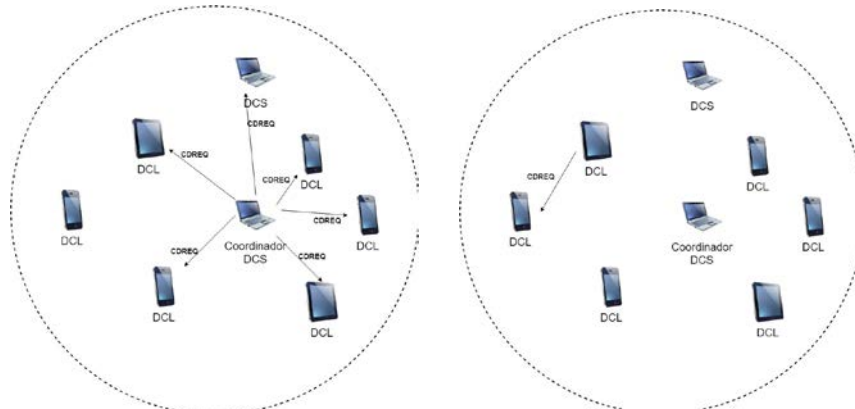


Figura 12. Envío unicast de CDREQ: a) El Coordinador envía mensaje CDREQ a los clientes, b) Dispositivo intermedio reenvía por unicast un CDREQ

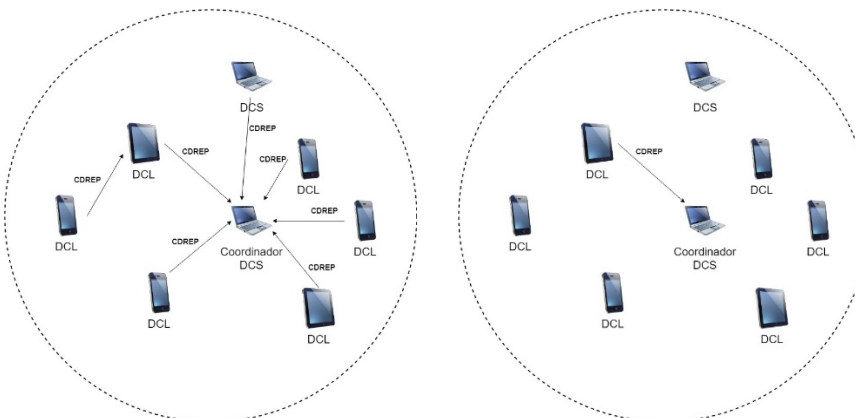


Figura 13. Envío unicast de CDREP: a) Los clientes envían mensajes CDREP al coordinador, b) Dispositivo intermedio reenvía por unicast un CDREP

Una vez que el coordinador envía el CDREQ a un nodo, espera el mensaje CDREP por parte del cliente durante un período de tiempo; ese tiempo se encuentra registrado en el campo *lifetime*. Se maneja un tiempo de expiración debido a la volatilidad de la permanencia de los nodos en este tipo de redes.

Una vez que el coordinador recolecta todos los paquetes CDREP de los clientes que fueron afectados a la computación; en el campo *TNResult* de cada uno de ellos se encuentra el resultado del cálculo. Luego se compagina cada una de las partes del cómputo y se obtiene el resultado final. Si, por el contrario, alguno de los paquetes CDREP no llegará al coordinador antes de que se venza el *lifetime*, el coordinador entenderá que esa parte del cómputo se perdió y dará por fallido el mismo, pudiendo más adelante volver a intentar calcular en forma distribuida las partes faltantes con los clientes que registra como activos dentro del clúster y para eso volviendo a generar mensajes CDREQ para la computación de dichas partes.

En las líneas anteriores, se analizó si un cliente alcanzado por un CDREQ se mueve quedando inaccesible como consecuencia modifica la topología, entonces el coordinador debe anular el cálculo distribuido o reasignar el computo que debía realizar el cliente que ahora es inalcanzable. Por otro lado, si el nodo que se mueve es el coordinador y existe algún computo en proceso, entonces el nodo que detecta el fallo genera un mensaje de error denominado RERR y lo envía por multicast a todos los nodos del clúster. El mensaje RERR tiene como propósito en estos casos invalidar el computo en cada cliente como se muestra en la Figura 14. Todos los nodos por los que pasa el mensaje RERR que a su vez han sido afectados formando parte en el computo distribuido cancelan la ejecución de dicho computo; una vez que el mensaje RERR llega a todos los nodos, estos inician nuevamente el proceso para establecer una nueva afiliación de clúster y de este modo saber que nodo será su nuevo coordinador.

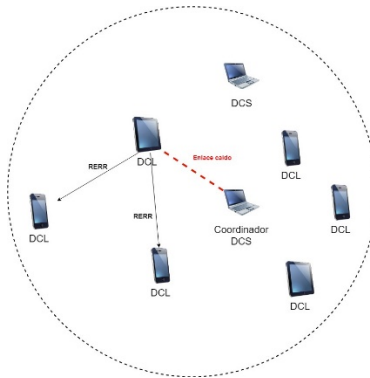


Figura 14. Envío de RERR por coordinador fuera de alcance

3.4 Entorno de Simulación

Network simulator NS-2 [15] es un simulador de eventos discretos que se encuentra dividido en dos partes en cuanto a lenguaje de programación refiere, la que opera con el lenguaje Object-oriented Tool Command Language OTCL y la que opera con el lenguaje C++.

NS-2 fue la herramienta seleccionada para evaluar la performance del nuestro protocolo. La velocidad de movilidad del nodo se varía según la Tabla 9 y de acuerdo con el modelo de movilidad Random Waypoint. El modelo de movilidad describe el patrón de movimiento de los nodos móviles y cada nodo es responsable de calcular su propia posición y velocidad. El tiempo de simulación se establece en 200 segundos. El generador de tráfico Constant Bit Rate CBT se utiliza para la transferencia de paquetes de datos. Las simulaciones se han realizado utilizando los parámetros antes mencionados y los restantes se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Nro. de dispositivos	10, 20, 50, 100, 150
Nro. de dispositivos DCSs	6, 12, 30, 60, 100
Nro. de dispositivos DCLs	4, 8, 20, 40, 50
Nro. de clusters	2, 4, 10, 20, 50
Coordinadores por cluster	2, 4, 20, 60, 100
Tiempo de simulación	200 segundos
Área total de simulación	500 x 500 mts
Modelo de movilidad	RWP
Protocolos	PROCCDIMI, AODV, DSR, DSDV
Protocolo MAC	IEEE 802.11b
Rango de transmisión (Tx)	100 mts.
Velocidad	5, 10, 15 Km/h
Pausas	Ninguna
Energía inicial	100.0 Joules

3.5 Métricas de rendimiento

La evaluación del rendimiento, como así el diseño y el desarrollo de los protocolos de ruteo en MANET requieren que sean examinados meticulosamente bajo parámetros estandarizados dentro de la materia de estudio. Estos últimos son seleccionados de acuerdo a la IETF RFC 2701 [16], la cual recomienda el uso de un conjunto de métricas destinadas al estudio y evaluación de rendimiento de diferentes protocolos pensados para trabajar en redes MANET. Cuando se evalúa la performance en los protocolos de ruteo o de otro tipo destinados a trabajar sobre redes móviles ad hoc es importante contrastarlos contra ciertos parámetros para dimensionar correctamente su rendimiento.

3.5.1 Tasa de Entrega de Paquetes

La Tasa de Entrega de Paquetes se define como el número de paquetes entregados al nodo destino sobre el total enviados por el nodo origen. Con lo cual esta tasa tomará valores entre 0 y 100 por ciento. En esta

interpretación, un paquete que no puede ser ruteado debido a que el nodo origen no conoce ninguna ruta hacia el destino es contado como un paquete enviado, pero no entregado, con lo cual se penaliza al protocolo interpretando que la actualización de su conocimiento de la topología de la red es no es óptima. Por lo tanto, una tasa menor a 100 significa que los paquetes se perdieron en el camino o que no se pudo encontrar ninguna ruta al destino. Claramente es deseable tener una alta proporción de entrega de paquetes en cualquier tipo de red y más en las redes inalámbricas móviles [17]. Esta métrica dimensiona la confiabilidad del protocolo en cuanto a la transmisión de información [18].

3.5.2 Throughput

Throughput es definida como la tasa en que se entregan todos los datos al destino. Es el total de todos los bits exitosamente entregados a destinos individuales y es expresado como bytes por segundo (byte/sec) o bits por segundo (bit/sec). También puede verse como el tiempo que le toma al destino recibir el último mensaje con información [19]. Por consiguiente, es una medida de efectividad de un protocolo.

3.5.3 Costo energético promedio

El costo energético promedio dimensiona el consumo de energía promedio de los nodos que conforman la red al utilizar el protocolo que se está evaluando durante la simulación. Este valor se calcula como la suma de las diferencias registradas entre la energía inicial del nodo menos la energía que posee el mismo luego de terminada la simulación dividida la cantidad de nodos que componen la red. La energía es un recurso escaso y un mal manejo de la misma por parte de un protocolo podría desencadenar el agotamiento de la batería de nodos críticos en términos de conectividad y afectar la disponibilidad de la red, es decir, dejando unidades de red aisladas debido a que las que proveían conectividad de encuentra off line debido a que su batería no posee carga. Por lo tanto, es de suma importancia utilizar la energía de manera eficiente [20].

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los protocolos de enrutamiento AODV, DSR y DSDV solamente se remiten al encaminamiento de paquetes sobre las redes MANET y no realizan ninguna operación adicional a esta última. Mientras que PROCCDIMI resuelve el ruteo junto con todas las tareas involucradas en la gestión del cómputo científico y la administración de los clientes que resuelven las tareas dentro de la computación distribuida. Dada esta disparidad de responsabilidades y a pesar de la misma, las pruebas de rendimiento se llevaron a cabo utilizando los protocolos antes mencionados, ya que en los escenarios tradicionales lo único común que puede haber son justamente los protocolos de ruteo, debido a que el resto es muy dependiente de cada proceso, de cada forma de construcción, de cada configuración y hasta de cada plataforma, con lo cual es imposible poder realizar una evaluación en los mismos términos.

Al no disponerse de un mecanismo, aplicación o herramienta unificadora comparable a nuestra propuesta, que resuelva tanto el ruteo de paquetes como la indeterminación de los clientes de la red MANET más la asignación de tareas y recolección de resultados, entonces se prefirió utilizar los protocolos de enrutamiento tradicionales para realizar las comparaciones con PROCCDIMI donde se tiene presente siempre que este último realiza operaciones adicionales además del enrutamiento de paquetes y evaluándose la performance incluyendo tareas propias del ruteo y lo antes mencionado. Pese a estas diferencias de procesos involucrados los resultados analizados son similares en cuanto a las métricas destinadas a los protocolos de red y en lo concerniente a la métrica del consumo de energía promedio, PROCCDIMI que exhibe un comportamiento superior al resto de los protocolos con los que se lo contrastó.

En la Figura 15 se observa que PROCCDIMI tiene una tasa de entrega de paquetes notoriamente superior cuando se trata de redes con una cantidad de nodos que oscila entre 10 y 20 nodos y por ende convirtiéndolo en un protocolo más confiable respecto a los demás analizados. Cuando se analiza PROCCDIMI en redes con un número de nodo superior a 20 nodos exhibe una confiabilidad superior al 80% convirtiéndolo en un protocolo que otorga un nivel de confiabilidad que rivaliza con los otros protocolos con los cuales se lo contrastó.

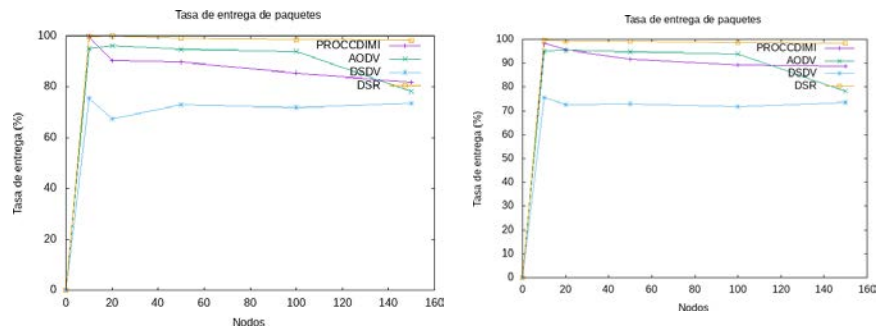


Figura 15. Resultados de evaluar la tasa de entrega de paquetes sobre diferentes números de nodos: a) Tasa de entrega de paquetes vs. Número de nodos *a*, b) Tasa de entrega de paquetes vs. Número de nodos *b*

Los resultados que se pueden apreciar en la Figura 16 indican que no hay diferencias significativas entre las curvas de desempeño, sobre todo en las curvas que se corresponden a las simulaciones realizadas con números de nodos relativamente pequeños 10 y 20, puesto que la velocidad de transmisión de todos los protocolos ronda los 10kbps en el primer caso y 20kbps en el segundo, con la salvedad de DSDV que está cercano a los 15kbps.

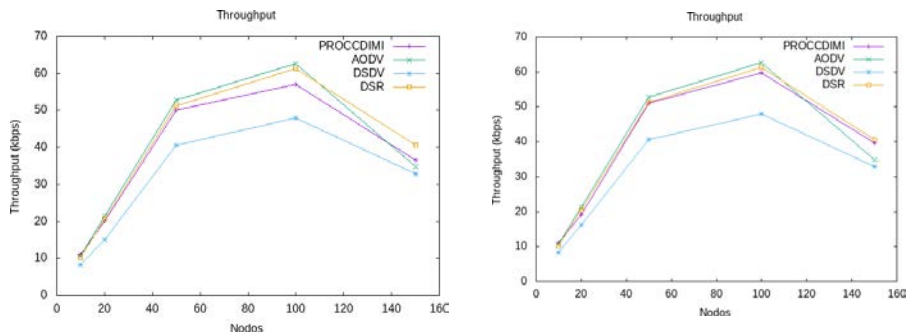


Figura 16. Resultados de evaluar el Throughput sobre diferentes números de nodos: a) Throughput vs. Número de nodos *a*, b) Throughput vs. Número de nodos *b*

Para redes más grandes en términos del número de nodos, los rendimientos se tornan más heterogéneos, aunque PROCCDIMI se mantiene en el rango medio de desempeño, no siendo el que registra ni la mejor, ni la peor velocidad de transmisión. Si se tiene en cuenta que el protocolo aquí propuesto además de resolver cuestiones de enrutamiento de paquetes como los demás protocolos contra los que se lo compara, resuelve el descubrimiento de nuevos clientes y asignación de clústeres de pertenencia, que se mantenga en velocidades de entrega similares a los otros protocolos que solo se encargan de enrutar paquetes es realmente significativo. Este aumento en la tasa de Throughput se explica por el diseño de clustering de PROCCDIMI que otorga una ventaja sobre la capa de acceso al medio ayudando a incrementar la rapidez de la conexión y, por tanto, a conseguir mayor tasa de transmisión de datos [21].

En la Figura 17 se puede apreciar que la curva correspondiente a PROCCDIMI asciende por debajo de las demás curvas, lo que indica que este protocolo consume menos energía que el resto. El hecho de que PROCCDIMI tenga menor gasto energético, es producto de la estrategia de agrupamiento de los nodos, dado que uno de los beneficios que se esperan al formar clústeres, es la reducción del consumo de energía [20].

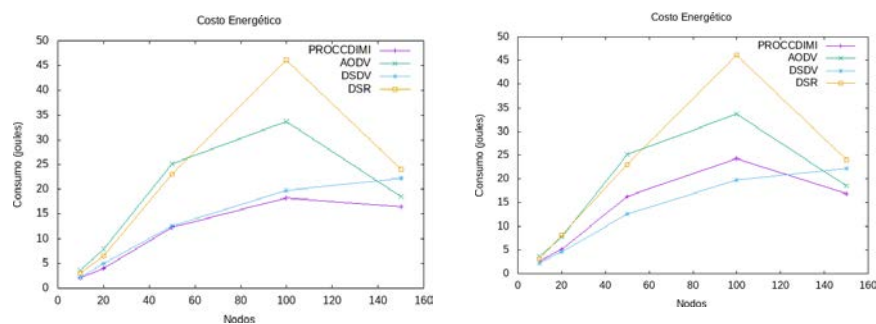


Figura 17. Resultados de evaluar el consumo de energía promedio sobre diferentes números de nodos: a) Consumo de energía promedio vs. Número de nodos *a*, b) Consumo de energía promedio vs. Número de nodos *b*

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta un nuevo protocolo llamado PROCCDIMI que organiza los nodos de la MANET en clústeres y elige coordinadores de estos agrupamientos lógicos a los dispositivos con capacidades superiores, para que estos asuman el rol de asignar los clústeres de pertenencia a las unidades de red que lo solicitan, tomar el cálculo científico entre los cliente que llevarán a cabo dicho computo en forma distribuida y finalmente recolectar todos los resultados parciales, compilarlos y devolver el resultado del cálculo científico. Ciertamente los coordinadores tendrán una mayor carga de trabajo. La adopción de un diseño cross layer que emplea al protocolo de enrutamiento AODV como mecanismo de red subyacente, permite llevar a cabo: el proceso de ruteo, de descubrimiento de nuevos clientes, asignación de tareas y recolección de resultados, todo en forma simultánea extendiendo los mensajes de control originales de AODV con el fin de minimizar el número de mensajes necesarios en este proceso.

De los resultados obtenidos se arribó a las siguientes conclusiones:

- PROCCDIMI es notoriamente superior en términos de confiabilidad y Throughput cuando se trata de redes relativamente pequeñas en cuanto a cantidad de nodos y cuando el número de nodos asciende exhibe un desempeño similar al resto de los protocolos de enrutamiento contra los cuales se lo comparó.
- PROCCDIMI es el mejor en cuanto al manejo de la utilización de la energía ya que es el que consumió menos de esta última durante las simulaciones realizadas, mientras que el resto registró niveles de consumo superiores. El hecho de que PROCCDIMI tenga menor gasto energético es producto de la estrategia de conformar grupos lógicos de nodos, dado que es uno de los beneficios que se espera obtener al formar agrupamientos lógicos, es la reducción del consumo de energía. De todos modos, que la solución aquí propuesta tenga un consumo de energía menor al resto de los protocolos contra los que se lo comparó y teniendo en cuenta toda la actividad extra que realiza, es realmente sorprendente.
- Finalmente, se puede concluir que el diseño cross layer, la organización de nodos en clústeres y el uso de protocolos de enrutamiento reactivo, como AODV, brindan la plataforma adecuada en términos de confiabilidad, velocidad de transmisión de datos y consumo de energía para la implementación de nuevas soluciones con características de desempeño similares, y en algunos casos con mejores resultados, que los protocolos de enrutamiento ya establecidos en el campo de los MANET.

REFERENCIAS

- [1] H. Kaur, V. Sahni, and M. Bala, "A survey of reactive, proactive and hybrid routing protocols in manet: A review," *network*, vol. 4, no. 3, pp. 498–500, 2013.
- [2] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das *et al.*, "Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing," 2003.
- [3] E. M. Belding-Royer and C. E. Perkins, "Evolution and future directions of the ad hoc on-demand distance-vector routing proto-col," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 125–150, 2003.
- [4] X. Zhang and G. F. Riley, "Performance of routing protocols in very large-scale mobile wireless ad hoc networks," in *13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. IEEE, 2005, pp.115–122.
- [5] J. Edwards and R. Bramante, *Networking self-teaching guide: OSI, TCP/IP, LANs, MANs, WANs, implementation, management, and maintenance*. John Wiley & Sons, 2015.
- [6] G. Tolosa, "Protocolos y modelo osi," Recuperado: <http://www.tyr.unlu.edu.ar/TYR-publica/02-Protocolosy-OSI.pdf>, 2014
- [7] A. Awang, K. Husain, N. Kamel, and S. Aissa, "Routing in vehicular ad-hoc networks: a survey on single-and cross-layer design techniques, and perspectives," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9497–9517, 2017.
- [8] M. Brindha, "A survey on cross layer distributed topology control in mobile adhoc network," *Bonfring International Journal of Networking Technologies and Applications*, 4 (1), 1, vol. 3, 2017.
- [9] V. Golla, G. Jayanthi, and H. Shivashankar, "Designing energy routing protocol with power consumption optimization in manet," *IEEE Transactions on Emerging topics in Computing*, vol. 2, no. 2, pp. 192–197, 2014.
- [10] M. Conti, G. Maselli, G. Turi, and S. Giordano, "Cross-layering in mobile ad hoc network design," *Computer*, vol. 37, no. 2, pp. 48–51, 2004.
- [11] E. M. Belding-Royer, S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, "Routing approaches in mobile ad hoc networks," *Mobile ad hoc networking*, vol. 1, no. 1, pp. 275–300, 2004.

- [12] D. Chander and R. Kumar, "Qos enabled cross-layer multicast routing over mobile ad hoc networks," *Procedia Computer Science*, vol. 125, pp. 215–227, 2018.
- [13] M. A. Wister Ovando, "Arquitectura de descubrimiento de servicios en manet basada en dispositivos de capacidades superioresliderando clusters," *Proyecto de investigació*, 2009.
- [14] I. D. Chakeres and E. M. Belding-Royer, "Aodv routing protocol implementation design," in *24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. IEEE*, 2004, pp. 698–703.
- [15] U. de California, "The network simulator - ns-2, 1999. Recuperado: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [16] G. Malkin, "Nortel networks multi-link multi-node ppp bundle discovery protocol," in *Technical Report*. September 1999. RFC 2701, 1999.
- [17] P. Manickam, T. G. Baskar, M. Girija, and D. D. Manimegalai, "Performance comparisons of routing protocols in mobile ad hoc networks," *arXiv preprint arXiv:1103.0658*, 2011.
- [18] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc networkrouting protocols," in *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 1998, pp. 85–97.
- [19] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. R. Das, "A multichannel csma mac protocol for multihop wireless networks," in *WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No. 99TH8466)*, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 1402–1406.
- [20] A. P. Pati, K. R. Kanth, B. Sharanya, M. D. Kumar, and J. Malavika, "Design of an energy efficient routing protocol for manets based on aodv," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 4, p. 215, 2011.
- [21] B. A. Correa, L. Ospina, and R. C. Hincapié, "Survey of clustering techniques for mobile ad hoc networks," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 41, pp. 145–161, 2007.

Arquitectura de solución para un Sistema de Información de seguridad radiológica en medidores nucleares

Andrea Sánchez Galindo¹
Jesús Enrique Londoño Salazar²
John Willian Branch Bedoya³
Juan Guillermo Ramírez González⁴
Yonatan Zuleta Ochoa⁵
Carolina Osorio Castrillón⁶
^{1, 4-6} *Servicio Geológico Colombiano*
^{2, 3} *Universidad Nacional de Colombia*
Colombia

A todas las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones ionizantes les aplica el objetivo fundamental de la seguridad, que consiste en proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. La seguridad se alcanza mediante un sistema de gestión que involucre las interacciones entre las personas con la tecnología y las organizaciones. Se concibió como situación problemática el hecho de que los registros especificados en el sistema de gestión de las instalaciones radiactivas se crean y mantienen en documentos físicos. De ahí que, aplicando la Metodología de Marco Lógico MGA, se identificó la necesidad de impulsar el desarrollo de soluciones tecnológicas para la transformación digital de los registros que faciliten el análisis de la información, la toma de decisiones en pro de la seguridad, la generación de conocimiento y que mejoren la productividad y la sostenibilidad. En primera medida se limitó el alcance del estudio al uso de medidores nucleares, por ser la práctica más representativa en Colombia en cuanto al número de instalaciones. Los medidores nucleares son equipos cuyo principio de funcionamiento se basa en la interacción de la radiación ionizante con la materia, y que se utilizan en la industria para garantizar la calidad de los productos, optimizar los procesos o ahorrar energía y materiales. Posteriormente, se implementó el enfoque de Arquitectura de Solución para la concepción de la necesidad de negocio a partir de los resultados preliminares, los requisitos de seguridad establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica y la estructura de registros de una instalación piloto. Finalmente, se construyó el diseño de alto nivel para el caso de uso Sistema de Información de Seguridad radiológica en medidores nucleares, contemplando la concepción general del sistema, las capas de usuario Web y APP, y la capa de administración y gestión.

¹ Ingeniera Química, especialista en Gestión Pública. Evaluadora e Inspectora del Grupo de Licenciamiento y Control del Servicio Geológico Colombiano SGC.

Contacto: asanchezg@sgc.gov.co

² Doctor en Ingeniería y Arquitecto Empresarial y de Solución.

Contacto: jelondonos@unal.edu.co

³ Profesor Titular e investigador senior, Director del Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial GIDIA.

Contacto: jwbranch@unal.edu.co

⁴ Físico, Magíster en Física Médica. Profesional del Grupo de Investigación y Aplicaciones Radiactivas del Servicio Geológico Colombiano SGC.

Contacto: jgramirez@sgc.gov.co

⁵ Físico. Evaluador e Inspector del Grupo de Licenciamiento y Control del Servicio Geológico Colombiano SGC.

Contacto: yzuleta@sgc.gov.co

⁶ Ingeniera Física, Magíster (c) en Física. Vinculada al Grupo de Investigación y Aplicaciones Nucleares y Geo-cronológicas del Servicio Geológico Colombiano SGC.

Contacto: cosorio@sgc.gov.co

1. INTRODUCCIÓN

La responsabilidad primordial de la seguridad en las instalaciones que introducen riesgos asociados a las radiaciones ionizantes recae sobre la persona u organización a su cargo, quien desde el diseño y durante la vida útil de la instalación o la duración de las actividades debe adoptar medidas de seguridad con la finalidad de proteger la vida, la salud humana y el medio ambiente [1]. En este sentido, el liderazgo en pro de la seguridad debe ejercerse desde los más altos niveles de la organización, para lo cual resulta imprescindible implementar un sistema de gestión que integre todos los aspectos relacionados con la seguridad. Además, para garantizar que las medidas de seguridad adoptadas son las apropiadas, es importante aplicar un enfoque sistemático en el cual se considere el sistema en conjunto y las interacciones entre los factores técnicos, humanos y organizativos [2].

En el sistema de gestión debe especificarse los registros que son objeto de control. Los registros deben estar completos y legibles, ser identificables y fácilmente recuperables [2]. Esto implica que la persona u organización a cargo de la seguridad en las instalaciones radiactivas deba definir cómo, cuándo y por quién es registrada la información. A su vez, debe establecer los mecanismos adecuados para la conservación de los registros y el análisis de la información. De modo tal, que el sistema de gestión debe contar con un esquema de registros que le permita tomar decisiones en pro de la seguridad y de la optimización de los recursos, así como demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad.

Se identificó las desventajas en realizar los registros en documentos físicos en comparación con los documentos digitales. Principalmente, se dificulta el análisis de la información y por ende la toma de decisiones. Los documentos físicos son más susceptibles a daños, alteraciones, errores en el registro, falta de trazabilidad y pérdidas de información. Además, se genera reprocesos en actividades de registro y procesamiento de la información por lo que se tiene mayor impacto ambiental y costos asociados a la gestión documental, como también se dificulta la generación de conocimiento [3].

Por ende, resulta beneficioso emprender acciones que conduzcan a la transformación digital de los registros del sistema de gestión de las instalaciones radiactivas con el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones [4]. La solución tecnológica que se proponga para esta finalidad desde el diseño debe, por una parte, involucrar los aspectos apropiados en pro de la seguridad en las instalaciones radiactivas, y por otra, tener la capacidad de capturar los datos de forma fiable y eficaz, garantizar la seguridad y la trazabilidad de los registros, y aplicar técnicas de analítica descriptiva. Es así, que la digitalización de los registros se debe enmarcar en el cumplimiento de los objetivos de seguridad en las instalaciones y en la apertura o explotación de los datos relacionados con la seguridad radiológica.

Por lo anterior, en este trabajo se aplicó el enfoque de arquitectura de solución [5] para el diseño de una solución tecnológica que permita la gestión de los registros relacionados con la seguridad radiológica. La aplicación del enfoque abordó la fase de concepción de la necesidad y de diseño de alto nivel. En la primer fase, para definir el alcance de la solución se tuvo en cuenta que el uso de medidores nucleares se constituye como la práctica más representativa en el país⁷ en términos del número de instalaciones en operación [6]. La instrumentación y control es fundamental en los procesos industriales para garantizar la calidad de los productos, optimizar los procesos o ahorrar energía y materiales; aquellos dispositivos de control cuyo principio de funcionamiento se basa en la interacción de la radiación ionizante con la materia son conocidos como medidores nucleares [7].

Su utilización se ha expandido a nivel industrial entre otras razones debido a que la radiación ionizante responde a las propiedades físicas fundamentales de la materia, por su alta sensibilidad y fiabilidad y porque permiten realizar la medición sin contacto [8]. De esta manera, la concepción de la necesidad de negocio se ciñó para esta práctica teniendo en cuenta los resultados preliminares de la Metodología de Marco Lógico, los requisitos de seguridad específicos para el uso de medidores nucleares [9] y el esquema de registros de la Refinería de Cartagena S.A.S., quien participó como instalación piloto.

⁷ A mayo de 2021, en Colombia existen 170 instalaciones en operación en la práctica de medidores nucleares, que equivalen a un 37% del total de instalaciones radiactivas del país.

El diseño de alto nivel de la solución se construyó sobre una arquitectura tradicional de capas, que pueda ser implementada de manera progresiva, para el caso de uso Sistema de Información de seguridad radiológica en medidores nucleares contemplando la capa de concepción general del sistema de información, las capas de usuario Web y APP, la capa de administración y gestión. Según el ciclo del proceso de desarrollo y construcción de un proyecto de software [5], sobre el resultado obtenido se requiere adelantar estudios adicionales para ahondar en la fase de gestionar la demanda con antelación a las etapas de diseño detallado, validación de la arquitectura y construcción de la solución.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Diseño de arquitectura de solución

El alcance del Diseño de Arquitectura de Solución busca en primera instancia tener una concepción clara de la necesidad a resolver, sustentada en un buen conocimiento de la problemática, la definición de objetivos, el alcance del proyecto, las restricciones y los lineamientos de tipo tecnológico. En un siguiente momento, se busca plasmar en diferentes instrumentos de tipo arquitectónico el entendimiento de la necesidad y un primer esbozo de escenarios de solución; lo anterior, acompañado de validaciones y definiciones que se realizan de manera conjunta con los usuarios funcionales dueños de producto, sumado a los lineamientos tecnológicos de la entidad que desarrolla el proyecto.

Después de tener completa claridad sobre la concepción de la necesidad, las definiciones funcionales y tecnológicas, se plantean decisiones de tipo arquitectónico para la construcción de la solución, entre las que se resaltan: patrones, *frameworks* y tecnologías que se utilizarán para el diseño y construcción de la solución o aplicativo. Además, se hace un análisis preliminar de los requisitos no funcionales o atributos de calidad, para indicar la forma y el alcance sobre cómo serán cubiertos de cara a cumplir con los requisitos funcionales y considerando las restricciones, principalmente de tipo tecnológico.

2.1.1 Arquitectura de solución: Un enfoque general.

El proceso de diseño, construcción e implementación de una solución tecnológica involucra diferentes fases que tienen su punto de inicio la identificación y el planteamiento de una necesidad de negocio, la interpretación y análisis en términos de las necesidades funcionales que deben ser cubiertas, la conversión de estas en requisitos de tipo arquitectónico y tecnológico, el planteamiento de una viabilidad tecnológica de implementación, la estimación de recursos de ejecución y por último, un ciclo de iteraciones para la construcción de la solución tecnológica que cubre las siguientes etapas: 1) definiciones y diseño de la Arquitectura de alto nivel - arquitectura empresarial; 2) diseño detallado de Arquitectura -arquitectura de solución; 3) diseño detallado de componentes -especificaciones de software; 4) desarrollo y programación de la solución -construcción de software; 5) implementación en ambientes computacionales controlados - ambiente de pruebas y certificación; y 6) puesta en producción -ambiente productivo, hasta llegar a la etapa final de liberación y puesta en funcionamiento. En la Figura 1 se esquematiza el ciclo del enfoque de Arquitectura de Solución propuesto.

2.1.2 Concepción general de la solución

Los requisitos funcionales soportados en capacidades tecnológicas pueden ser concebidos, proyectados y estructurados bajo un enfoque y visión de una *Solución de Negocio*, y no simplemente como un aplicativo o componente de software. Bajo esta clase de enfoque, el alcance de la iniciativa o necesidad de negocio tendrá una visión integral que garantice la integridad conceptual y la capacidad de interpretar y describir todo el entorno que impacta la necesidad específica; lo anterior, es independiente a que la implementación de la solución se realice de manera progresiva o evolutiva durante una línea de tiempo.

La concepción y alcance de la solución debe hacerse de forma íntegra o completa desde las primeras fases de estructuración de la iniciativa, para lo que se precisa tener una comprensión clara de los requisitos funcionales, los que deben ser traducidos en un diseño de Arquitectura de Solución con una visión

transversal, y no simplemente desde un enfoque y alcance específico. En la Figura 2 se esquematiza la primera vista de la Arquitectura de Solución denominada Concepción General de la Solución.

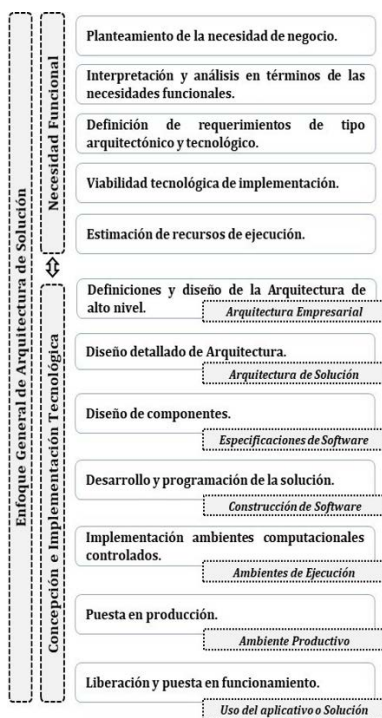


Figura 1. Enfoque arquitectura de solución

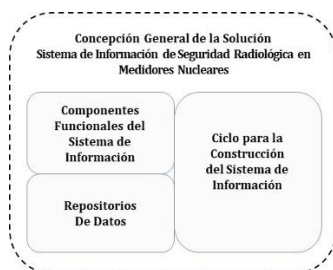


Figura 2. Concepción general de la solución

Esta vista de la Arquitectura tiene como objetivo presentar un primer bosquejo de los componentes que hacen parte del alcance de la solución desde una perspectiva funcional. Las capacidades de tipo funcional - funcionalidades que deben ser implementadas, y los conceptos de información -que más adelante se convertirán en los repositorios de datos. También se presenta una secuencia lógica de las capacidades que deben ser implementadas y que debe ser cubiertas por el ciclo de gestión de la solución.

2.2 Medidores nucleares

Los medidores nucleares son aquellos que permiten controlar, medir o analizar un producto u objeto a partir de la interacción de un haz o campo de radiación ionizante con los componentes de ese producto u objeto, seguido por la detección de la radiación transmitida o dispersada [10]. Están compuestos de una o varias fuentes de radiación dispuestas en un arreglo geométrico fijo directamente relacionadas con uno o más detectores de radiación. Dependiendo el tipo de aplicación se pueden clasificar como medidores de espesor y masa por unidad de área, medidores o interruptores nivel, medidores de densidad y densidad aparente, analizadores nucleares, medidores de contenido de hidrógeno o de humedad, entre otros [11].

Los medidores nucleares se utilizan a nivel industrial porque su principio de medición no requiere el contacto con el material medido y por la alta sensibilidad y fiabilidad en la medición; ofreciendo ventajas frente a la instrumentación convencional, sobre todo en condiciones exigentes de proceso, tales como altas presiones, altas temperaturas, fluidos corrosivos, cambios de fase durante el proceso, presencia de espumas o vapores densos, estratificación de lodos, entre otras. Además, porque su diseño puede ser

adaptado a las especificaciones de medición para cada proceso en particular con la selección del radionúclido y mediante variaciones en la actividad o contenido de material radiactivo.

En la Figura 3 se aprecia la configuración más simple de un medidor nuclear, que es aquella en la cual el material a medir se interpone entre la fuente radiactiva y el detector, de tal manera que el haz de radiación se transmite a través del material. En este caso, la radiación emitida interactúa con el material a medir y la intensidad de la radiación en el detector es una función de varios parámetros característicos del material y de la fuente de radiación.

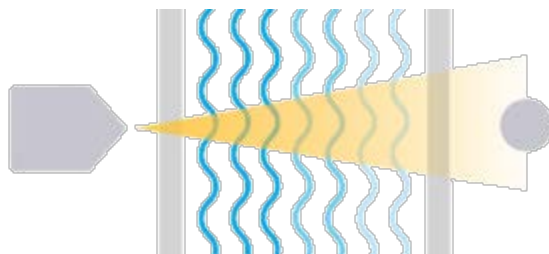


Figura 3. Principio de medición por transmisión

Según el diseño o configuración del medidor nuclear el principio de medición puede ser la transmisión de rayos gamma o beta, la transmisión de rayos gamma de doble energía, la retrodispersión, la absorción de rayos gamma de múltiple energía para medidores de flujo multifase, entre otros [7].

3. MÉTODO

Se concibió como situación problemática el crear y mantener en medios físicos (papel) los registros del sistema de gestión para la seguridad en las instalaciones radiactivas. Para lo cual, se aplicó la Metodología del Marco Lógico LFA [12]. De esta manera, en este estudio se contempló: análisis de involucrados o partes interesadas; identificación del problema, así como sus causas y efectos, mediante la construcción del árbol de problemas; análisis de objetivos con la diagramación de la situación futura a la que se desea llegar; y, por último, planteamiento de una alternativa de solución. El resultado del análisis del problema concluyó en la necesidad de impulsar las soluciones tecnológicas para los registros del sistema de gestión que integra la seguridad en las instalaciones radiactivas.

En la Figura 4 se esboza la metodología abordada en este estudio. Se precisa de manera general las actividades que se realizaron en las dos fases planteadas para el ciclo de Arquitectura de solución: Concepción de la necesidad de negocio y Diseño de alto nivel [5].

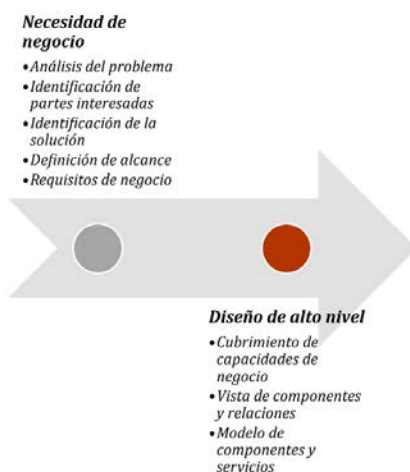


Figura 4. Metodología para la arquitectura de solución (Adaptada de [5])

Para estructurar la necesidad se tuvo en cuenta los resultados obtenidos con el análisis LFA, los requisitos de seguridad establecidos en normativa nacional y guías de seguridad específica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la estructura de registros de la instalación piloto.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados del trabajo se consolidan en la conceptualización de la necesidad del negocio y en el diseño de alto nivel o arquitectura de la solución.

4.1 Necesidad de negocio

4.1.1 Análisis mediante árbol causa-efecto

En la Figura 5 se muestra el árbol de problemas (causa-efecto) que se obtuvo del análisis del hecho de que los registros del sistema de gestión en las instalaciones radiactivas se realicen en documentos físicos. Se identificó como causas principales la falta de disposición de recursos económicos y la falta de desarrollos tecnológicos que permitan el uso de las Tecnologías de Información y Comunicaciones TIC. Siendo la primera causa determinada, no solo por la posible escasez de recursos, sino también por otros factores como la falta de compromiso del más alto nivel en la organización, los bajos niveles de percepción del riesgo y de cultura de seguridad, los cuales no promueven que se adelanten acciones para la transformación digital de estos registros.

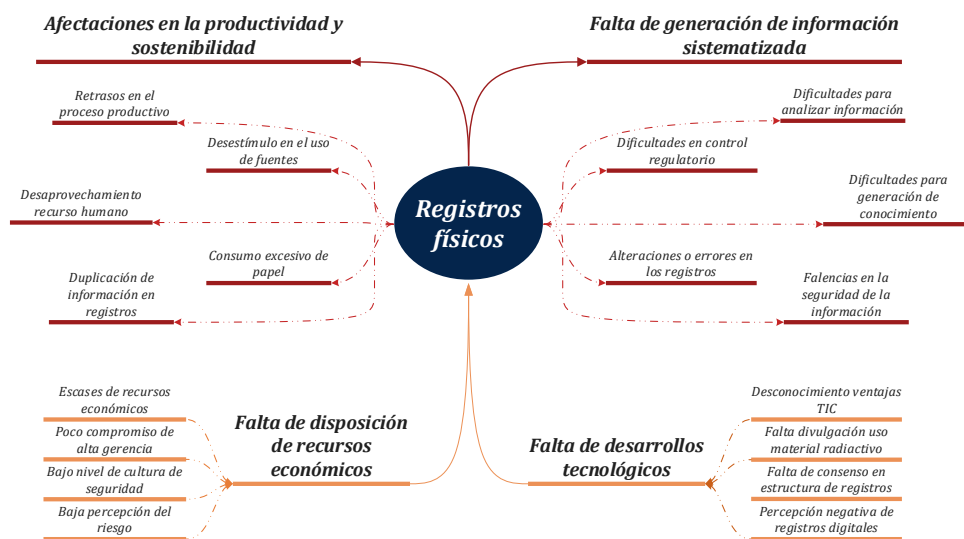


Figura 5. Diagrama de causas y efectos del problema (Árbol de problemas)

Con respecto a la falta de desarrollos tecnológicos, es de anotar que los sistemas de información existentes se han enfocado en las responsabilidades de los Órganos Reguladores y no en la responsabilidad de los titulares de autorización (máximos responsables), lo cual puede ser debido al desconocimiento o falta de divulgación con respecto al uso del material radiactivo que promueva desarrollos tecnológicos para los sistemas de gestión así como las percepciones negativas o el desconocimiento de las ventajas de las TIC por parte del personal de las instalaciones radiactivas. Además, se identificó los efectos principales del problema los cuales involucran afectaciones en la productividad y sostenibilidad en las instalaciones, así como limitaciones o falta de generación de información sistematizada que dificulta el análisis de la información, la toma de decisiones en pro de la seguridad, la generación de conocimiento, entre otras.

4.1.2 Identificación partes interesadas

El sistema de gestión en las instalaciones radiactivas respalda el cumplimiento del objetivo fundamental de la seguridad, proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes [2]. En este sentido, en la identificación de partes interesadas se encuentra en primer lugar el titular autorizado, siendo el personal directivo o alta dirección de las instalaciones radiactivas quien asume la responsabilidad de ejercer liderazgo en pro de la seguridad, así como de integrar la seguridad en el sistema de gestión. Además, en las instalaciones radiactivas existe el rol de Oficial de Protección Radiológica OPR quien es considerado como el responsable primario de la seguridad [13]. Dependiendo de la estructura

organizacional de cada instalación se tendrán otros interesados, ya sea que estén clasificados como trabajadores ocupacionalmente expuestos TOE o como miembros del público [14].

De otra parte, los Gobiernos a través de los Órganos Reguladores deben establecer la legislación, regulaciones y guías para la protección y seguridad, además de establecer un sistema para garantizar su implementación [15]. De tal forma, que dentro de sus acciones se incluyen trámites de notificación y autorización, revisión o inspección a instalaciones radiactivas, acciones coercitivas, entre otros. Por tanto, se constituye la Autoridad Reguladora Nuclear (Ministerio de Minas y Energía y Servicio Geológico Colombiano en ejercicio de funciones delegadas) como una parte interesada dentro del sistema de gestión de las instalaciones radiactivas. Así mismo, teniendo en cuenta que la operación de las instalaciones radiactivas puede estar sujeta a controles adicionales se identificó otras autoridades o entes de control como partes interesadas: Ministerio de Transporte, Ministerio de Trabajo, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA, entre otras.

Finalmente, como terceros interesados se identificó las empresas que tienen potencial de utilizar materiales radiactivos y para las cuales contar con un desarrollo tecnológico facilitaría la integración de la seguridad en el sistema de gestión. Además, personas interesadas en consultar información asociada al uso de material radiactivo y la seguridad radiológica con fines de generación de conocimiento o investigación.

En la Figura 6 se muestra el resultado del análisis de partes interesadas mediante la matriz de impacto e influencia en el sistema de gestión. Las partes interesadas de los cuadrantes superiores hacen parte de la capa lógica de negocio, las otras se configuran en los servicios de terceros. Más adelante, el resultado del análisis de impacto e influencia de las partes interesadas servirá de insumo para el diseño detallado de la solución, en el cual se define el manejo o perfil que tendrá cada parte interesada o rol dentro de la solución.

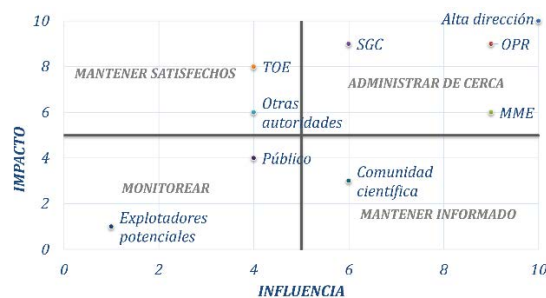


Figura 6. Matriz análisis de partes interesadas

4.1.3 Identificación de la solución

A partir del análisis de causas y efectos de la situación problemática, contemplando una situación futura ideal en la cual se eliminen las causas más profundas, se concibió como objetivo promover en las instalaciones radiactivas la apropiación de las TIC para los sistemas de gestión (Figura 7). Para alcanzar la situación deseada es fundamental la disposición de recursos económicos que viabilicen el diseño y desarrollo de las soluciones tecnológicas mediando el compromiso del más alto nivel de la dirección.

Además, es necesario el diseño de estructuras de registro que permitan la implementación de soluciones tecnológicas en instalaciones del mismo tipo que permitan la captura de los datos en el lugar y momento en que se originan. También, debe mediar la generación de espacios de apropiación del conocimiento referente a los usos de material radiactivo que promuevan la inversión en este tipo de desarrollos, así como de divulgación de las ventajas o beneficios de los registros digitales y del uso de las TIC. Se tiene a la vista una solución tecnológica que permita la transformación digital de los registros del sistema de gestión en las instalaciones radiactivas con la finalidad, por una parte, de impactar positivamente en la productividad y sostenibilidad de las instalaciones redundando en estímulos en el uso de fuentes radiactivas, y por la otra, generar información sistematizada que facilite el análisis de la información y la toma de decisiones en pro de la seguridad, que permita la generación de conocimiento en el campo de seguridad radiológica y que facilite el control regulatorio.

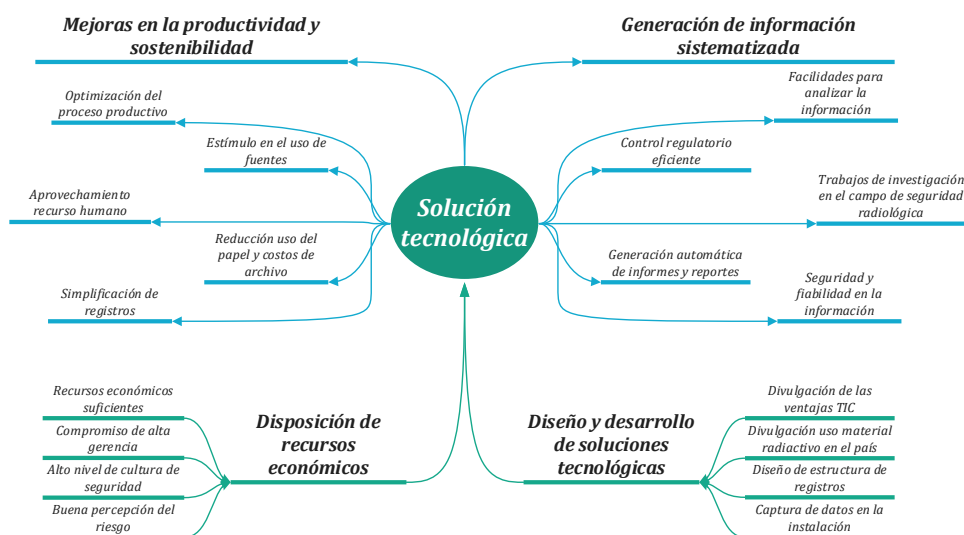


Figura 7. Diagrama de medios y fines de la solución (Árbol de objetivos)

4.1.4 Definición de alcance

El diseño de la solución se limitó al caso de uso *Sistema de Información de Seguridad Radiológica en Medidores Nucleares*. Lo anterior, teniendo en cuenta que en Colombia existe cerca de 500 instalaciones radiactivas y nucleares utilizadas en el sector industrial, médico, de investigación o docencia; de las cuales, la práctica más representativa en términos del número de instalaciones en operación es el uso de *Medidores Nucleares* [16]. Además, en Colombia no se fabrican fuentes radiactivas por tanto el alcance contempló solo el uso de los medidores nucleares, incluyendo importación, transporte, actividades rutinarias de monitoreo y mantenimiento, almacenamiento temporal y devolución al exterior para su gestión definitiva.

Por otra parte, se contempló que la solución tecnológica tenga la capacidad de recibir información sobre un desarrollo WEB y también captar datos mediante código QR y GPS sobre un desarrollo APP. A su vez, la capa lógica de negocio cuenta con algoritmos de analítica de datos a nivel descriptivo y procesamiento inteligente de documentos que permitan generar informes o reportes automáticos, tableros de control, alertas, estadísticas en materia de seguridad radiológica, entre otros.

4.1.5 Requisitos de negocio

El objetivo fundamental de seguridad es proteger a las personas y al medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, aplicable a todas las instalaciones y actividades, durante todas las etapas de la vida útil de una instalación o fuente de radiación, incluyendo la planificación, el emplazamiento, el diseño, la fabricación, la construcción, la puesta en servicio y la explotación, así como la clausura y el cierre, incluyendo operaciones asociadas de transporte de material radiactivo y gestión de residuos radiactivos [1]. En la Figura 8 se presenta un esquema de las fases de una instalación radiactiva especificando las obligaciones fundamentales de notificación y autorización previstas de conformidad con la reglamentación vigente [13].

Es así, que en el establecimiento de los requisitos de negocio se partió de la definición del componente de instalaciones radiactivas. El cual considera las especificaciones de diseño de la instalación a partir de las cuales se establecen relaciones con el tipo de medidor nuclear a utilizar, estructura organizacional, disposiciones y tecnología necesaria para garantizar tanto la operación de los equipos como la seguridad. Además, las relaciones de información definidas por las obligaciones fundamentales en cuanto a notificación y autorización que se requieren en cada etapa o estado de la instalación; las cuales se conciben en la capa de servicios de terceros.

La evaluación de seguridad es la herramienta principal para determinar las medidas de control que deben implementarse y confirmar que se han tenido en cuenta todos los factores que influyen en la protección y

seguridad, debe ser documentada y su revisión debe estar contemplada dentro del sistema de gestión de las instalaciones o entidades explotadoras [15]. Es así, que la evaluación de seguridad se constituye como el eje central a partir del cual se definen y evalúan las medidas de protección y seguridad de la instalación.



Figura 8. Obligaciones fundamentales según la fase de la instalación

De acuerdo con la normatividad vigente en Colombia, las entidades explotadoras mediante procesos de autorización deben demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad mediante los siguientes documentos: 1) Memoria Descriptiva de la Instalación, 2) Manual de Protección Radiológica, 3) Manual de Seguridad Física, 4) Evaluación de la Seguridad, 5) Plan de Emergencias Radiológicas, 6) Manual de procedimientos, y 7) Plan de Gestión para fuentes selladas en desuso [13]. Es así, que al documentar las medidas de protección y seguridad se encuentran relaciones entre los documentos y por ende en la información registrada; en consecuencia, existe varios registros que contienen la misma información (p.ej. identificación de las fuentes, trabajadores, equipos, etc.)

Para establecer una estructura de registros que permita la captura de los datos y el manejo de la información generada mediante una solución tecnológica, en este caso para instalaciones radiactivas que utilizan medidores nucleares, se partió de los requisitos para el programa de protección radiológica establecidos en la guía de seguridad específica del OIEA No. SSG-58 *Radiation Safety in the Use of Nuclear Gauges*[9], los documentos exigidos en la normativa nacional, los registros previstos y los registros identificados en la instalación piloto. En la Tabla 1 se presenta el resultado de la identificación de los registros necesarios para demostrar el cumplimiento de los requisitos de protección y seguridad en el uso de medidores nucleares, según las recomendaciones del OIEA.

Tabla 1. Registros asociados a los requisitos de seguridad en el uso de medidores nucleares

Requisito de seguridad ^a	Documentos ^b	Registros
a. Estructura de gerencia y políticas para la protección y seguridad.	Manual de Protección Radiológica.	Política; Estructura organizacional.
b. Asignación de responsabilidades individuales para la protección y seguridad.	Manual de Protección Radiológica, Manual de procedimientos.	Roles y responsabilidades; listado de trabajadores ocupacionalmente expuestos; clasificación de trabajadores.
c. Programa de entrenamiento sobre la naturaleza y peligros de la radiación, y las medidas requeridas para la protección y seguridad.	Manual de Protección Radiológica.	Contenido; presentaciones; calificaciones; criterios de calificación por rol; cronograma; registros de asistencia; evaluaciones.
d. Reglas locales y disposiciones para la supervisión del trabajo con medidores nucleares.	Manual de Protección Radiológica, Manual de procedimientos, Memoria Descriptiva de la Instalación.	Autorizaciones de acceso o permisos de trabajo; dosis sufridas por visitantes que acceden a zonas controladas; charlas de seguridad; medición de tasa de dosis; calibración de equipos de protección radiológica y seguimiento; cartas de control de equipos; informes de mantenimiento; verificación de señales y etiquetas; calificaciones; registros de dosis; niveles de referencia; planos y esquemas; resultados de pruebas de pérdida de hermeticidad.

e. Clasificación de zonas supervisadas y controladas como sea apropiado.	Memoria Descriptiva de la instalación, Manual de Protección Radiológica.	Verificación de señales y etiquetas; planos y esquemas; descripción de las características de los blindajes; descripción del equipo y su funcionamiento; medición de tasas de dosis; controles de acceso; niveles de referencia.
f. Protección y seguridad de las fuentes radiactivas incluyendo la gestión de las fuentes en desuso.	Manual de Seguridad Física, Plan de Gestión de Fuentes Selladas en Desuso.	Autorización de importación; certificado de origen; inventario de fuentes radiactivas; autorización de operación; criterios para declarar fuentes en desuso; planos y esquemas; resultados de pruebas de fugas; movimiento de fuentes; verificaciones del sistema de seguridad; medición de tasas de dosis; autorizaciones de acceso o permisos de trabajo; dosis sufridas por visitantes que acceden a zonas controladas; registros de transporte.
g. Preparación y respuesta a emergencias radiológicas.	Plan de Emergencias Radiológicas.	Escenarios de exposición potencial; definición de situaciones de emergencia; niveles de referencia; roles y responsabilidades; simulacros; calificaciones; procedimientos de actuación; datos de contacto de entidades intervinientes; informe de atención; dosis de personal interviniente.
h. Disposiciones para la evaluación de exposición ocupacional (si es requerido) y para el monitoreo del sitio de trabajo incluyendo la adquisición, las pruebas y mantenimiento de los instrumentos de vigilancia radiológica.	Manual de Protección Radiológica, Manual de Procedimientos.	Medición de tasas de dosis; historiales dosimétricos de trabajadores ocupacionalmente expuestos, calibración de equipos de protección radiológica y seguimiento; cartas de control de equipos; planos y esquemas; niveles de referencia; inventario de equipos; verificación funcional; calificaciones.
i. Programa de vigilancia médica (si es requerido).	Manual de Protección Radiológica.	Programa de supervisión médica; listado de trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE), historial dosimétrico de TOE, certificado de aptitud médica.
j. Sistema de registro y reporte de la información relacionada con el control de las exposiciones, las decisiones generadas de las medidas para la protección y seguridad a la exposición ocupacional y los resultados del monitoreo individual y del sitio de trabajo.	Manual de Protección Radiológica, Manual de Procedimientos.	Informe anual al Órgano Regulador; revisión de los registros por el OPR.
k. Métodos de revisión periódica y auditoría del desempeño del programa de protección radiológica.	Manual de Protección Radiológica, Manual de Procedimientos.	Programa de auditoría, planes, listas de verificación, informes; informes de inspección por el Órgano Regulador; reportes de incidentes y accidentes; revisiones de la evaluación de seguridad.
l. Requisitos para el aseguramiento de la calidad y procedimientos de mejora.	Manual de Protección Radiológica, Manual de Procedimientos.	Políticas; Criterios de auditoría; requisitos legales; revisiones de la evaluación de seguridad.

^a Conforme al numeral 4.6 de la SSG-58 (OIEA); ^b Según requisitos de autorización Resolución 9 0874 de 2014 (MME)

En la Figura 9 se presenta un esbozo de la estructura general de registros conforme al análisis de requisitos específicos para la práctica y teniendo como centro la instalación radiactiva. Como se mencionó anteriormente, existe información que es relacionada en varios registros en los diferentes bloques identificados en la estructura propuesta.

Como ejemplo de las relaciones entre los bloques, se consideró el registro de las mediciones de tasas de dosis o *Monitoreo Radiológico* durante la vigilancia de las zonas. En esta actividad el trabajador debe hacer presencia física en el sitio de la fuente, con previa autorización del Oficial de Protección Radiológica, registrar la información de la fuente a monitorear y del equipo utilizado para realizar las mediciones.

El registro generado involucra información de varios bloques propuestos en la estructura (resaltados en la Figura 9). Se concibe que la información previa puede ser capturada mediante el uso de códigos QR, coordenadas de localización por GPS y datos cargados previamente en los repositorios de datos; con lo cual, se facilita el registro, se garantiza la trazabilidad de la información, se reduce las posibilidades de error y se viabiliza que el trabajador se enfoque en la operación específica, en este caso únicamente en la medición de los niveles de radiación y su reporte.



Figura 9. Estructura general de registros propuesta

En el caso específico, en el programa de protección radiológica debe describir las disposiciones establecidas para la selección, calibración, mantenimiento, verificación funcional y uso de los equipos de vigilancia radiológica o medición de tasa de dosis en el lugar de trabajo. Por lo tanto, es mandatorio la especificación de los lugares donde deben realizarse las mediciones de tasa de dosis, así como la frecuencia de dichas mediciones. En todo caso, los lugares donde se debe realizar el monitoreo son [9]:

- Alrededor de las instalaciones de almacenamiento de medidores y fuentes, para garantizar un nivel adecuado de blindaje.
- Alrededor de los medidores durante las operaciones rutinarias, para confirmar que las tasas de dosis se mantienen por debajo de los valores especificados en las normativas u orientaciones nacionales y por la organización operativa.
- Alrededor de los medidores durante las operaciones de mantenimiento, para confirmar que el obturador del medidor está cerrado o que el generador de radiación está apagado.
- En los puestos de los operadores durante el uso de los medidores portátiles, para confirmar que los niveles de radiación son aceptables.
- En los puestos de los operadores durante las operaciones de carga y descarga de la fuente;
- En la entrada de un recinto de medidores, para confirmar que la persiana del medidor está cerrada o que el generador de radiación ha dejado de emitir radiación.
- Alrededor del paquete de transporte antes de transportar un medidor portátil hacia y desde el lugar, para confirmar la presencia de la fuente.
- Alrededor de los vehículos que transportan medidores portátiles antes de la salida hacia y desde el lugar.

Además, en el programa de protección radiológica se debe incluir los niveles de referencia para la vigilancia radiológica de zonas y las medidas de actuación en caso de que se superen[17]. En la Figura 10 se muestra un desarrollo ampliado del esquema de registro asociado a la operación de monitoreo radiológico.

En el diagrama se tiene como entrada la información previa requerida como la ubicación de las fuentes radiactivas y la identificación de los trabajadores ocupacionalmente expuestos, las fuentes radiactivas, los equipos asociados y los equipos de protección radiológica utilizados para las mediciones de los niveles de radiación. Además, como entradas se señalan las actividades previas al monitoreo como la verificación de dosimetría personal (en caso de ser necesaria) y la verificación funcional de los equipos a utilizar para la medición. Por otra parte, las salidas del diagrama corresponden a los datos que verifica o mide el trabajador en el momento del registro y con los cuales alimenta el sistema de información.

En la Figura 11 se observa un medidor nuclear junto con las señales de advertencia. Alrededor del medidor nuclear, en los puntos previamente establecidos en el Manual de Protección Radiológica, se realizan las mediciones de tasa de dosis.

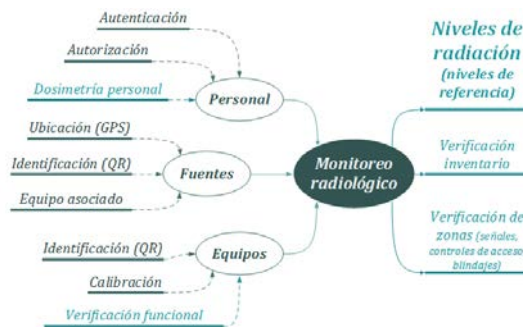


Figura 10. Registros asociados al monitoreo radiológico



Figura 11. Medidor nuclear. Tanque D16, Planta de alquilación, Refinería de Cartagena S.A.

En la Figura 12 se presenta el histórico de monitoreo radiológico de los últimos 3 años para el nivel superior del tanque de D16 de la instalación piloto, en 4 de los 11 puntos de medición. En este nivel del tanque se encuentran instalados dos medidores nucleares de tipo interruptor de nivel con fuente radiactiva de ^{137}Cs con actividad inicial de 5 mCi al 5 de febrero de 2014. Los niveles de referencia se encuentran establecidos en el Manual de Protección Radiológica de la instalación, para este equipo se tiene definido como nivel de investigación el valor de 25 mSv/h independiente del punto de medición.

Los datos de monitoreo radiológico en la instalación piloto actualmente se registran en documentos físicos y son transcritos para su procesamiento y análisis posterior. No se cuenta con una solución tecnológica que permita registrar de manera inmediata los niveles de radiación medidos, procesar la información y generar vistas buenas al monitoreo o en su defecto alarmas oportunas en caso de que se supere el nivel de investigación ya sea por afectaciones en la seguridad, por fallas humanas en la medición o en los equipos detectores de radiación. Recibir de manera oportuna información que contraste los niveles medidos con las disposiciones del programa de protección radiológica facilita la toma de decisiones en pro de la seguridad en la entidad explotadora.

Además, considerando que esta información debe ser procesada para el informe anual de condiciones de práctica, almacenar y procesar las mediciones mediante un sistema de información optimiza los recursos dispuestos para tal fin. De otra parte, se visualizó la oportunidad de capturar datos mediante el monitoreo radiológico que permiten contrastar en tiempo real el inventario de material radiactivo de las instalaciones. El reporte de monitoreo radiológico (Figura 12) es un ejemplo de las salidas que se espera implementar con la solución tecnológica. Esta salida podría ser presentada mediante tableros de control para las entidades explotadoras o como reportes dirigidos al Órgano Regulador o terceros interesados.

4.2 Diseño de alto nivel

En la Figura 13, bloque-1 se presenta el detalle de los componentes funcionales del Sistema de Información propuesto. Continuando con la descripción detallada del enfoque de Arquitectura de Solución, en la Figura 13, bloque-2 se relaciona desde una perspectiva general los *conceptos de información* inherentes al manejo de la información del sistema de Seguridad Radiológica.

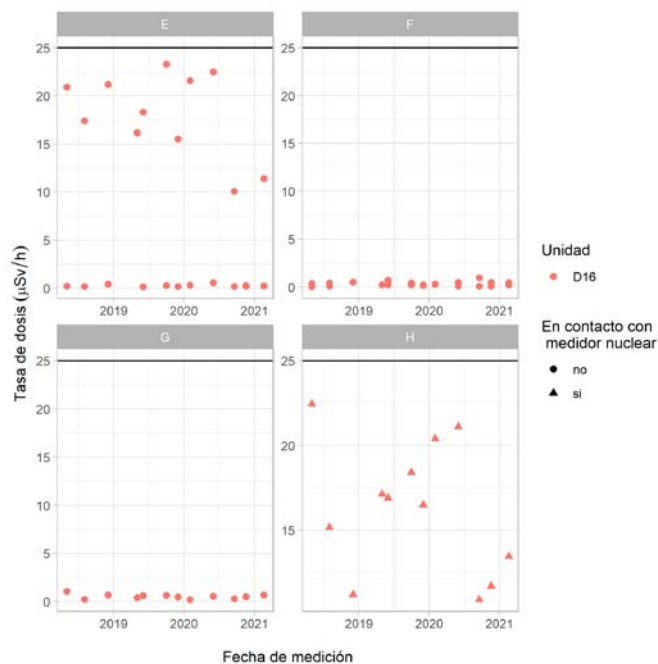


Figura 12. Histórico de monitoreo radiológico alrededor de Medidor Nuclear de la Instalación Piloto

Es importante que estos conceptos de información se vayan definiendo de manera progresiva a medida que se estructura y se realiza el diseño de la solución, para efectos de no perder de vista información y datos relevantes, asociado a las reglas de negocio y validaciones que debe aplicarse en el tratamiento de estos; los cuales, en una fase posterior del diseño sirve de insumo para el diseño y definición del modelo de datos y los repositorios de información (bases de datos) del sistema.

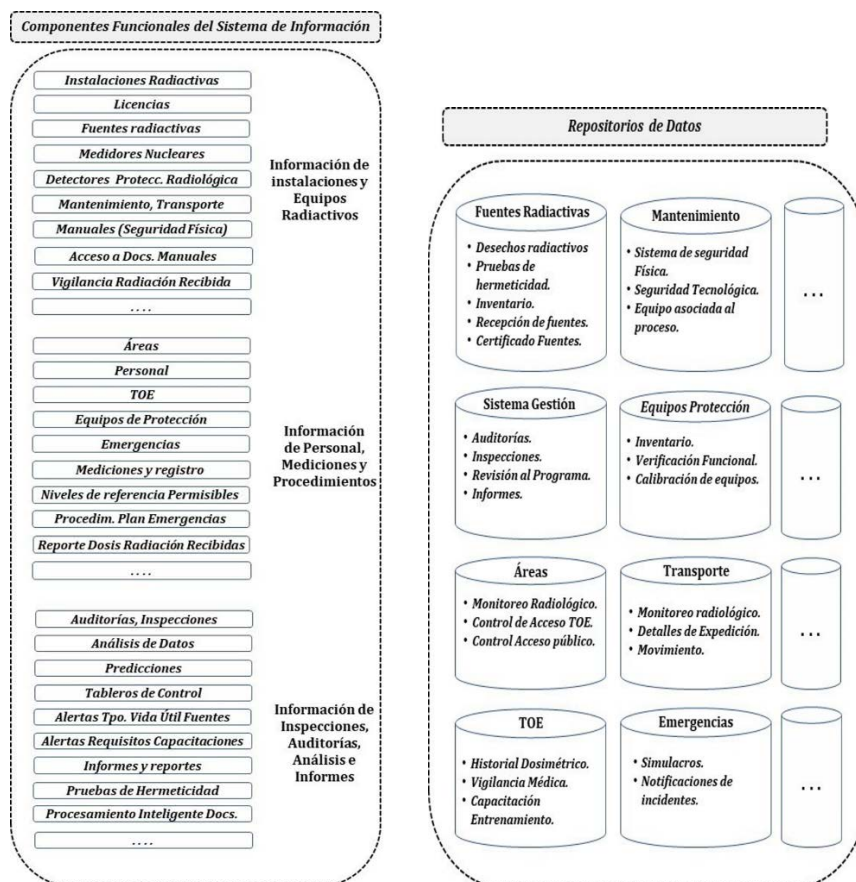


Figura 13. Componentes Funcionales y repositorio de datos

Como parte integral del proceso de construcción de la solución tecnológica, en la Figura 14 se relaciona las capacidades de alto nivel y las etapas que deben ser consideradas en ciclo de implementación.

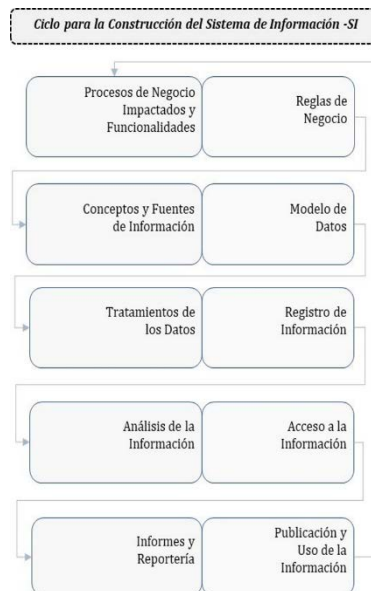


Figura 14. Ciclo de Construcción del Sistema de Información

A continuación, se describe las capacidades del ciclo de construcción e implementación de la solución:

- *Procesos de Negocio Impactados y Funcionalidades.* Análisis y definición de los procesos de negocio impactados, sumado al levantamiento de las especificaciones de tipo funcional para cada proceso.
- *Reglas de Negocio.* Definir y levantar las reglas de negocio que deben ser consideradas y con las cuales deben cumplir el diseño y construcción de la solución, incluyendo aspectos de tipo regulatorio y normativo.
- *Conceptos y Fuentes de Información.* Definir y caracterizar los conceptos de información desde la perspectiva funcional, el origen que tiene la información, y la identificación de los datos que se manejan en cada proceso (de entrada y de salida).
- *Modelo de Datos.* Definir las entidades de información, los datos que deben contener y las relaciones de negocio y de tipo funcional que se presenta entre las diferentes entidades.
- *Tratamientos de los Datos.* Determinar el comportamiento y las reglas que tendrán los datos a través de las diferentes operaciones que los impactan a nivel de: creación, modificación, análisis y eliminación.
- *Registro de Información.* Mecanismos que serán utilizados para la captura y registro de la información que alimenta el sistema (captura por pantalla, carga de datos, nuevos datos resultados del procesamiento, etc.).
- *Análisis de la Información.* Tratamiento que se aplica a los datos con que se alimenta el sistema. Puede incluir análisis de tipo operacional, descriptivo y predictivo.
- *Acceso a la Información.* Mecanismos de acceso a la información para las diferentes operaciones de interacción con el sistema (Web, App, Herramientas de Análisis y Extracción, Integraciones con otros sistemas, etc.).
- *Informes y Reportería.* Definición y diseño de las consultas y reportes que debe generar el sistema.
- *Publicación y Uso de la Información.* Mecanismos de publicación y acceso a la información por diferentes públicos en el ámbito de: registro, operación, consultas, exposición de servicios para externos, informes para entidades regulatorias.

4.3 Arquitectura Tecnológica

En este apartado se hace el despliegue de las diferentes capas y componentes de la Arquitectura tecnológica de la solución. En la Figura 15 se presenta la vista técnica de la solución, compuesta por las siguientes capas de la Arquitectura: 1) Capa de Front de usuarios; 2) Capa de Servicios de integración; 3) Capa de Exposición de Apis (capa de mediación); 4) Capa de Servicios de Negocio; 5) Capa de Persistencia de Datos; y 6) Capa de Servicios de terceros.

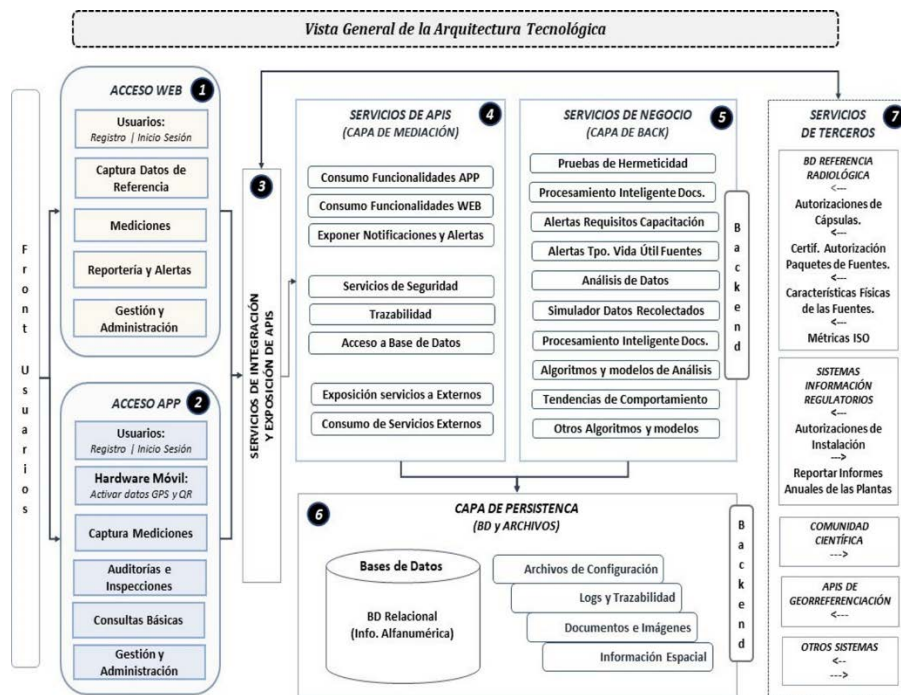


Figura 15. Vista General de la Arquitectura Tecnológica

4.3.1 Capa Front de Usuarios

Corresponde a los mecanismos de acceso que los usuarios utilizan para acceder al aplicativo para hacer uso de las funcionalidades que se exponen. El diseño incluye dos mecanismos de acceso:

1. *Acceso vía Web.* Utilizado para la captura de datos que alimentan el sistema, ejecución de procesos, consultas, reportes y operaciones para la administración y gestión de la solución (gestión de usuario, parametrizaciones y análisis de datos, entre otras funcionalidades) (Figura 15, bloque-1).
2. *Acceso vía App.* Este mecanismo está diseñado para habilitar el manejo de la información que requiere ser gestionada en campo o dentro de las plantas. Tiene aplicabilidad para la captura de datos en las actividades de medición y en las inspecciones. Se utilizan las capacidades que disponen los dispositivos móviles para georreferenciación, tomar fotos a equipos, códigos QR y transmitir datos en tiempo real (Figura 15, bloque-2).

4.3.2 Capa Servicios de Integración y Exposición de APIs

Es una capa de la Arquitectura que permite la conexión entre la *capa front* con los servicios o funcionalidades de negocio que se ejecutan en la *capa del backend*. Es una capa 100% de tipo técnico a la cual no tienen acceso los usuarios (Figura 15, bloque-3).

4.3.3 Capa Servicios de APIs

Esta capa también es llamada *capa de mediación*. Está compuesta por los servicios que le permiten a la *capa front* acceder a consumir las capacidades o funcionalidades de la *capa del backend* (lógica de negocio, bases de datos, servicios de seguridad, etc.). También permite exponer servicios para ser consumidos por aplicaciones externas, al igual de las conexiones para salir a consumir los servicios expuestos por terceros (Figura 15, bloque-4).

4.3.4 Capa Servicios de Negocio (Backend)

Esta capa también se denomina *capa de Lógica de Negocio*. Contiene las diferentes funcionalidades que permiten el tratamiento y el análisis de los datos, la generación de información como resultado del procesamiento, sumado a otras capacidades (Figura 15, bloque-5).

4.3.5 Capa de Persistencia de Datos.

Está compuesta por las bases de datos y los sistemas de archivos en los cuales se almacena toda la información que es gestionada a través del aplicativo (Figura 15, bloque-6).

4.3.6 Capa Servicios de Terceros

Corresponde a información que es suministrada (expuesta) por aplicaciones de terceros, y que es requerida por la solución para alimentar el sistema. En la Figura 16 se presenta con mayor detalle las funcionalidades que son expuestas a través del acceso vía Web (Captura de Información y Administración – Gestión).

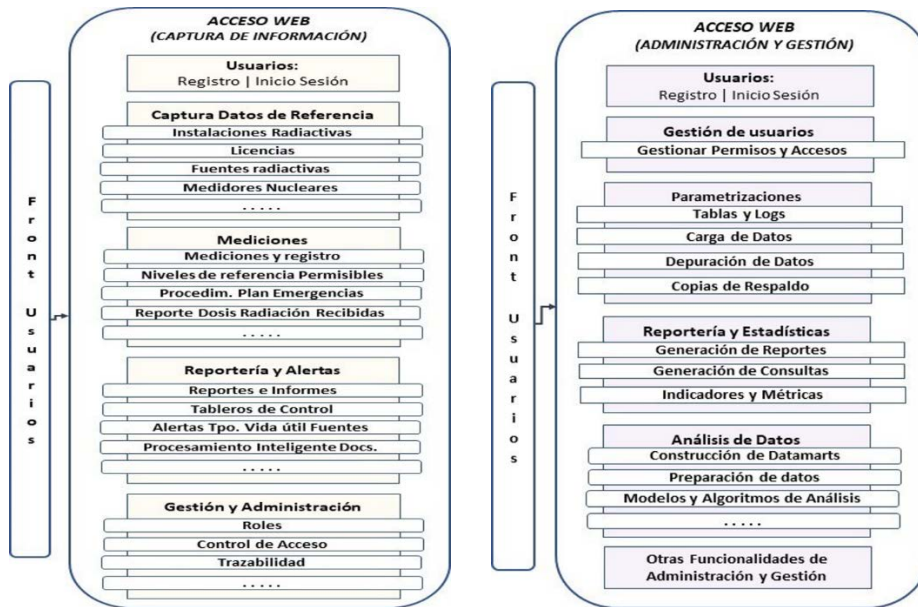


Figura 16. Acceso Web (Captura de información)

Por su parte, en la Figura 17 se presenta las funcionalidades que son expuestas a través del acceso vía APP.

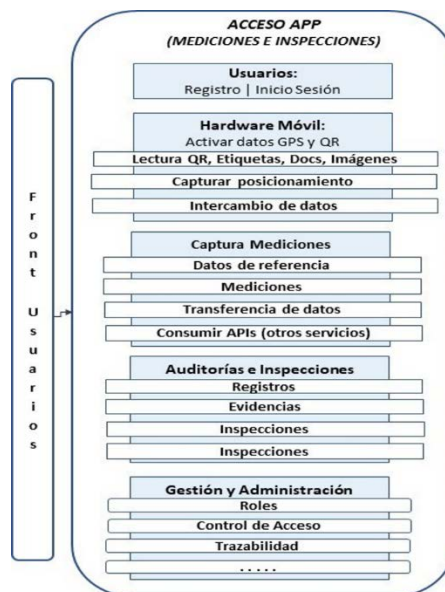


Figura 17. Acceso APP (Mediciones e Inspecciones)

5. CONCLUSIONES

El enfoque de Arquitectura de Solución aplicado en la concepción e implementación de soluciones tecnológicas es requerido y genera valor de cara a garantizar el adecuado entendimiento de la necesidad que se busca resolver, utilizando diferentes artefactos de tipo arquitectónicos que ayudan a decantar

escenarios de solución bajo una visión integral. La aplicación de este enfoque de Arquitectura en el caso de uso *Sistema de Información de Seguridad Radiológica en Medidores Nucleares* esquematiza la forma como se interrelacionan los diferentes componentes de la solución: *solución- aplicación-capas de la arquitectura y componentes*, donde, el concepto de solución alcanza un cubrimiento global de un requerimiento. De forma complementaria, bajo esta orientación se cubren las relaciones de uso que se dan entre los diferentes componentes que intervienen para el normal funcionamiento de la solución, tanto a nivel interno, como con otros sistemas y componentes externos.

Desde otra perspectiva, es importante resaltar la relevancia que toma el enfoque de Arquitectura de Solución para describir y articular los diferentes escenarios que involucran aspectos funcionales y de negocio, el manejo que debe darse a la información y las relaciones de uso e integración de los diferentes componentes involucrados. De igual forma, toma importancia el profundo conocimiento que se debe tener del funcionamiento del negocio y de los procesos específicos que se ven impactados por la solución.

Otro aspecto relevante al aplicar esta clase de metodologías es que permiten dimensionar la ejecución de los proyectos por etapas, los cuales pueden irse implementando de manera progresiva, lo que permite obtener productos mínimos viables que son usables y garantizando que la solución se ajusta a un diseño y a una planificación cohesionada.

La incorporación y el uso de diferentes tecnologías para la gestión y procesamiento de la información, facilita la captura de datos (al utilizar dispositivos móviles en sitio) y la transmisión en tiempo real de las mediciones efectuadas, las cuales alimentan los sistemas de decisión y apalancan la toma de decisiones de manera oportuna.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado del proyecto *Investigaciones en protección y seguridad radiológica y simulación de procesos radiactivos y nucleares* del Servicio Geológico Colombiano. Los autores reconocen la colaboración de la Dirección de Asuntos Nucleares DAN y de la Dirección de Gestión de la Información DGI del Servicio Geológico Colombiano. Los autores agradecen la participación de la Refinería de Cartagena S.A.S. como instalación piloto en este estudio, así como el suministro de información por parte de Ecopetrol S.A. y Continental Process Instruments S.A.S.

REFERENCIAS

- [1] Comunidad Europea de la Energía Atómica *et al.*, "Principios fundamentales de seguridad, Colección de Normas de seguridad del OIEA N° SF-1," *Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente*. OIEA, Viena, 2007.
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Liderazgo y gestión en pro de la seguridad. Requisitos de Seguridad Generales N° GSR Part 2*. OIEA, Viena, 2017.
- [3] Comisión Internacional de Protección Radiológica, *Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. ICRP N° 103*. España, 2007.
- [4] H. René and D. Giorgio, *Las TICs en las industrias. Bases para la evaluación del nivel de inserción de TICs en la industria*. Editorial UNLaM, 2019.
- [5] M. D. Arango Serna, J. E. Londoño Salazar, and J. W. Branch Bedoya, "Solution architecture approach, mechanism to reduce the gap between enterprise architecture and implementation of technological solutions," *Dyna*, vol. 82, no. 193, pp. 117–126, 2015.
- [6] Servicio Geológico Colombiano, "Sistema de información Xué, versión 1.0.1. Reporte de instalaciones." 2021.
- [7] International Atomic Energy Agency, *Technical data on nucleonic gauges. IAEA-TECDOC-1459*. Vienna, 2005.
- [8] G. A. Johansen and P. Jackson, *Radioisotope gauges for industrial process measurements*. John Wiley, 2004.
- [9] International Atomic Energy Agency, *Radiation Safety in the Use of Nuclear Gauges, Specific Safety Guide No. SSG-58*. IAEA, Vienna, 2020.
- [10] J.-L. Boutaine, "Nucleonic gauges for production processes: Non-invasive quality control," Vienna, 2015.
- [11] International Atomic Energy Agency, *Emerging new applications of nucleonic control systems in industry, IAEA-TECDOC-1142*. IAEA, Vienna, 2000.
- [12] E. Ortigón, J. Pacheco, and A. Prieto, *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL, 2015.

- [13] Ministerio de Minas y Energía, "Resolución 90874 de 2014, por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas." *Diario Oficial* No. 49241 del 12 de agosto de 2014, Colombia, 2014.
- [14] Ministerio de Minas y Energía, "Resolución 18 1434 de diciembre 5 de 2002, por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica.," no. 18. *Diario Oficial* No. 45027 de 10 de diciembre de 2002, Colombia, 2002.
- [15] Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA No. GSR Part 3*. Viena: OIEA, 2016.
- [16] A. Sánchez Galindo, J. G. Ramírez, and G. A. Parrado, "Percepciones del impacto de la pandemia de COVID-19 en las instalaciones radiactivas de Colombia," *Rev. Investig. y Apl. Nucl.*, no. 4, pp. 73–82, 2020.
- [17] International Atomic Energy Agency, "Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7." IAEA, Vienna, 2018.

Aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de aplicaciones que hacen gestión gráfica

Edwin Insuasty Portilla¹

Jesús Insuasti Portilla²

Universidad de Nariño
Colombia

En el desarrollo de aplicaciones con gestión de contenido gráfico es importante tener en cuenta aspectos que permiten elegir el lenguaje y plataforma más adecuados para su construcción, debido a que, si el proyecto de desarrollo está muy avanzado, migrarlo de lenguaje y plataforma a otros más apropiados es difícil, sobre todo cuando se trata de aplicaciones con una carga de gestión gráfica alta. Es conveniente tener una conceptualización general sobre la gestión gráfica, y para ello se analiza las posibilidades que sobre este tema tienen tres tipos de aplicaciones de escritorio: Windows Forms, WPF y las aplicaciones generadas con Adobe Animate CC. Como producto de esta reflexión se presenta algunas sugerencias o consideraciones, recopiladas de la investigación y experiencia construyendo aplicaciones con alta gestión gráfica, con el fin de que ayuden a los creadores a seleccionar adecuadamente la plataforma de desarrollo y su lenguaje de programación.

¹ Contacto: edwin@udenar.edu.co

² Contacto: insuasti@udenar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La gestión gráfica en el desarrollo de aplicaciones tiene muchos aspectos a considerar, dependiendo de los propósitos que se tengan al crear y manipular gráficos como mostrar, arrastrar y soltar, escalar, colisionar, construir, etc. En general, se puede decir que hay equivalencia entre lenguajes y plataformas de desarrollo para la gestión gráfica, en cuanto se trate de tareas como mostrar imágenes existentes y construir gráficos desde la aplicación elaborados en tiempo de ejecución, pero se encuentran diferencias en tareas de escalamiento, selección y detección de colisiones.

Los Ambientes Integrados de Desarrollo IDEs que se abordarán son Visual Studio y Animate CC los cuales permiten la creación de aplicaciones multiplataforma. En el caso de Visual Studio, los lenguajes soportados (Visual Basic, C++, Python, F#, JavaScript, Razor, TypeScript, C#) comparten los mismos recursos de gestión gráfica, por lo cual el lenguaje en este aspecto no tiene relevancia. En el caso de Adobe Animate CC, sus lenguajes soportados (JavaScript, HTML5, ActionScript) también comparten todo el soporte gráfico.

Por lo anterior, como los lenguajes en cada plataforma de desarrollo tienen los mismos recursos para el procesamiento gráfico, algunos aspectos puntuales que se mencionen en los ejemplos, se realizarán usando los lenguajes C# y ActionScript 3.0 en cada caso. Tanto Visual Studio como Animate CC, tienen la capacidad de producir aplicaciones multiplataforma (Linux, Windows, Android, iOS etc.), por lo cual se tomará una de ellas como referencia en este trabajo que particularmente se ha escogido la plataforma Windows.

A continuación, se abordará aspectos específicos de la teoría de gráficos computarizados aplicados en estos ambientes integrados de desarrollo, que se deben conocer para la construcción de aplicaciones con gestión gráfica.

2. MARCO CONCEPTUAL

Inicialmente se abordará lo relacionado con la gestión gráfica en las aplicaciones basadas en ventanas (Windows Forms), luego las nuevas aplicaciones con interfaces vectoriales (aplicaciones WPF) y por último las aplicaciones basadas en fotogramas y línea de tiempo (aplicaciones de Animate CC).

2.1 Gestión gráfica en aplicaciones basadas en ventanas (*Windows Forms*)

La tecnología .NET de Microsoft Windows es un entorno de ejecución y administración de aplicaciones de los últimos sistemas operativos Windows. La arquitectura de .NET es mostrada en la Figura 1, donde se encuentra el componente Common Language Runtime CRL. Esta tecnología mediante el componente CRL, permite la ejecución de las aplicaciones desarrolladas dentro de ella (código administrado) y también aplicaciones creadas con tecnologías anteriores a .NET (código no administrado)

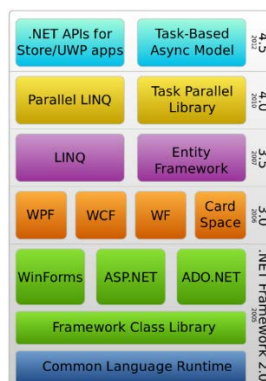


Figura 1. Arquitectura de .NET [1]

El CRL es el motor de ejecución y control de las aplicaciones, administrando para éstas la Biblioteca de Clases Base BCL. Cuenta con una implementación avanzada de la Interfaz de Dispositivo Gráfico GDI conocida

como GDI+, que es el elemento que permite la gestión gráfica de imágenes existentes o de imágenes creadas en tiempo de ejecución, incluyendo la renderización de texto y la misma representación de la interfaz de la aplicación en el dispositivo. La estructura del CLR se puede observar en la Figura 2.



Figura 2. Estructura interna del entorno de ejecución en lenguaje común [1]

Una aplicación basada en ventanas cuyo código fuente está escrito en cualquier lenguaje de .NET, es compilada inicialmente por el CLR a Lenguaje Intermedio MSIL; luego que el código está en lenguaje intermedio, es compilado a código de máquina nativo mediante el Just in time JIT [2]. El GDI+ es una biblioteca que permite mediante programación, gestionar y crear gráficos, renderizar texto e interactuar con dispositivos gráficos como impresoras, pantallas o monitores, escáneres y también generar archivos gráficos. Posee métodos para construir y manipular gráficos *rasterizados* o mapas de bits (fundamentalmente) y gráficos vectoriales 2D. Algunas características del GDI+ son:

- Además de las coordenadas enteras tradicionales, se cuenta con coordenadas de punto flotante.
- El componente alfa, que representa la opacidad de un color, es una nueva adición a la estructura Color.
- Posibilidad de mezclar alfa, suavizado y color
- Pinceles de textura y degradado.
- Líneas compuestas, curvas cardinales, regiones escalables, lápices de inserción, filtrado y escalado de alta calidad, y muchos estilos de línea nuevos y opciones de remates de línea.
- Soporte nativo para archivos de imagen en formatos como *.jpeg*, *.png*, *.gif*, *.bmp*, *.tiff*, *.exif* y *.icon*.
- Brillo, contraste y balance de color.
- Varias transformaciones, incluida la rotación y el recorte.
- Compatibilidad con *sRGB*, *ICM2* y *sRGB64*.
- El soporte de tipografía incluye *ClearType*, textura y textos rellenos de degradado [3].

Los servicios gráficos que se disponen para estas aplicaciones son: Gráficos vectoriales 2D, *Bitmaps* y Tipografía los cuales se detallarán a continuación. Los gráficos vectoriales 2D se administran a través de la clase *Graphics* mediante métodos que generan primitivas como línea, arco, curva, curva cerrada, curva de *Bézier*, curva cardinal, elipse, sector circular, polígono, rectángulo y formas rellenas, que se dibujan dando características de grosor y color con un objeto de la Clase *Pen* y las primitivas de formas rellenas que se configuran en el método correspondiente y un objeto de la Clase *Brush*.

Aunque se pueden crear secuencias de comandos *Graphics* y usar la Clase *MetaFile* para generar un gráfico vectorial, de hecho, una imagen vectorial se puede registrar en un metarchivo como una secuencia de órdenes gráficas. Para ello el GDI+ proporciona las clases *Metafile*, *MetafileHeader* y *MetaHeader* [4]. El GDI+ no tiene un codificador que pueda grabar formatos vectoriales WMF y EMF, por lo cual se debe acudir a la importación al proyecto de DLLs apropiadas lo que complica la tarea.

El segundo servicio gráfico que presta el GDI+ es la gestión de gráficos *rasterizados* o mapas de bits con la Clase *Bitmap*. Los constructores de esta clase permiten cargar un archivo de mapa de *bits* (se admiten los siguientes formatos de mapas de *bits*: *BMP*, *GIF*, *EXIF*, *JPG*, *PNG* y *TIFF*) en un objeto *bitmap* que se crea en la memoria, o crear en ella un objeto *bitmap* con unas dimensiones de ancho y alto y con los datos de cada píxel en ceros.

Después de creado el *bitmap* en memoria, ya sea en ceros o con un archivo de imagen cargado, es posible dibujar sobre él mediante primitivas proporcionadas por la Clase *Graphics*, o también procesarla píxel a píxel con métodos de la Clase *Bitmap* como *GetPixel* y *SetPixel*, o aplicarle diversas transformaciones como rotaciones, reflexiones, etc. Todo el trabajo que se realice en la memoria con el *bitmap*, solo se verá reflejado en la pantalla si este objeto se visualiza en otro que servirá de contenedor, como una ventana *Form* o un objeto *PictureBox*, asignando el *bitmap* mediante el método *DrawImage* de la clase *Graphics* a la propiedad *Image* del contenedor. Como es de esperarse, se puede guardar el *bitmap* en algún formato admitido mediante el método *Save* de su clase. Los gráficos vectoriales y los *rasterizados* utilizan la Estructura *Color* para configurar esta característica en ellos.

Cualquier color puede crearse a partir de una combinación de los componentes alfa, rojo, verde y azul (a los cuales se les llama valores *ARGB*). Los cuatro componentes *ARGB* son valores tipo *byte* que representan cantidades enteras en el rango de 0 a 255. El valor *alfa* determina la opacidad del color. Por ejemplo, el valor *alfa* cero representa un color transparente, y el valor 255 representa un color opaco. Los valores *alfa* entre 0 y 255 producen un efecto ponderado de mezcla del valor *RGB* del color con el de cualquier color de fondo, lo que ocasiona un efecto semitransparente [5].

Internamente, una transformación de color se maneja a través multiplicaciones de vectores y matrices cuadradas de dimensión 5, semejante a como se muestra en la Figura 3.

$$(0.2 \ 0.7 \ 0.5 \ 1.0 \ 1.0) \times \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (0.9 \ 0.8 \ 0.7 \ 1.0 \ 1.0)$$

Figura 3. Aplicación de un filtro a un píxel [6]

En este ejemplo, se está aplicando al color de un píxel (vector inicial), un filtro (multiplicación por la matriz) para transformarlo en otro color (vector resultante). Aplicar un filtro a una fotografía, requiere de multiplicar todos los vectores de los colores de los pixeles de la fotografía, por la matriz configurada al gusto. Para esto, habría que utilizar estructuras repetitivas o cíclicas; en realidad, esto no se programa porque hay métodos que lo hacen automáticamente, pero se debe comprender que justamente el método realiza todas las multiplicaciones. La Figura 4 muestra el efecto causado al aplicar a los pixeles de la fotografía original, una matriz adecuada para transformar los colores de sus pixeles a una escala de grises.



Figura 4. Aplicación de un filtro a una imagen

Naturalmente, hay que definir siempre la matriz que se va a aplicar. Esta matriz se suele conocer como filtro de color para alguna configuración especial de ella. En los graficadores o editores de imágenes como MS

Paint, Adobe PhotoShop y otros, se cuenta con la opción de administrar los colores de una imagen mediante los llamados canales rojo, verde, azul y *alpha*, facilitando desde la interfaz de la aplicación la asignación de los valores para estos canales. En realidad, el usuario lo que está haciendo al proveer los datos, es configurar la matriz de colores.

La matriz aplicada en este ejemplo se muestra en la Figura 5 y la configuración de ella se puede observar en la parte principal del código de la aplicación en la Figura 6.

$$\begin{bmatrix} .35 & .35 & .35 & 0 & 0 \\ .70 & .70 & .70 & 0 & 0 \\ .20 & .20 & .20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 5. Matriz de color para convertir a una escala de grises

```
private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    //El archivo debe estar junto al ejecutable
    escalaDeGrises("udena.jpg");
}

public void escalaDeGrises(string imagen)
{
    Bitmap bitmap1 = new Bitmap(imagen);
    Bitmap bitmap2 = new Bitmap(bitmap1.Width, bitmap1.Height);
    Graphics g = Graphics.FromImage(bitmap2);
    ColorMatrix matrizDeColores = new ColorMatrix(new float[][]
    {
        new float[] { .35f, .35f, .35f, 0, 0 },
        new float[] { .70f, .70f, .70f, 0, 0 },
        new float[] { .20f, .20f, .20f, 0, 0 },
        new float[] { 0, 0, 0, 1, 0 },
        new float[] { 0, 0, 0, 0, 1 }
    });
    ImageAttributes atributos = new ImageAttributes();
    atributos.SetColorMatrix(matrizDeColores);
    g.DrawImage(bitmap1, new Rectangle(0, 0, bitmap1.Width,
        bitmap1.Height), 0, 0, bitmap1.Width, bitmap1.Height,
        GraphicsUnit.Pixel, atributos);
    g.Dispose();
    pictureBox1.Image = bitmap1; //Imagen original
    pictureBox2.Image = bitmap2; //Resultado de aplicar el filtro
}
}
```

Figura 6. Aplicación de un filtro de color a una fotografía

En cuanto a la programación, el algoritmo sería independiente del lenguaje en aplicaciones *Windows Forms*:

- Cargar la fotografía al objeto *bitmap1*
- Crear el objeto *bitmap2* con las mismas dimensiones de *bitmap1*
- Crear el objeto *g* de la clase *Graphics* referenciando a *bitmap2*
- Crear la matriz de color con los datos de la *Figura 5*
- Crear el objeto *atributos* de la clase *ImageAttributes* con la matriz de color definida
- Aplicar el método *DrawImage* del objeto gráfico *g* a *bitmap1* con el objeto de atributos generado por la matriz. Esto multiplicaría cada vector de color de los pixeles de *bitmap1* por la matriz de color, y los colores resultantes se aplicarían a los pixeles de *bitmap2* que es referenciado por *g*
- Mostrar en objetos de visualización adecuados *bitmap1* y *bitmap2*

Cabe anotar que las transformaciones lineales como rotaciones, reflexiones, escalamientos, cizallamientos y las compuestas de las anteriores transformaciones con traslaciones, es decir, las llamadas en matemáticas transformaciones afines, todas ellas se realizan mediante operaciones matriciales.

Por ejemplo: Para rotar una imagen 30 grados, ajustar la escala en un factor de 4 en la dirección del eje X, en un factor de 8 en la dirección del eje Y, y finalmente se traslada 10 unidades en la dirección del eje X y 20 unidades en la dirección del eje Y, la matriz por la que se debe multiplicar los vectores coordenadas $(x, y, 1)$ de los pixeles la imagen es mostrada en la Figura 7.

$$\begin{bmatrix} \cos 30^\circ & 2\sin 30^\circ & 0 \\ -\sin 30^\circ & 2\cos 30^\circ & 0 \\ 10 & 20 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 7. Matriz de una Transformación Afín [4]

El tercer servicio gráfico del GDI+ es la Tipografía, es decir la representación gráfica de texto mediante una fuente de letra definida con todas sus características (tipo de letra, tamaño, atributos) [7]. El método *DrawString* renderiza una cadena de texto en una superficie gráfica.

Tiene muchas sobrecargas dependiendo de la toma de argumentos que identifican el texto, fuente, pincel, ubicación inicial y formato de cadena.

La forma más simple de una instrucción para *DrawString* se escribe así: *DrawString (cadena a renderizar, fuente, pincel, PointF)*; en donde *cadena a renderizar* es el texto que desea dibujar, *fuente* y *pincel* son la fuente y el pincel utilizados para dibujar el texto, y *PointF* es el punto de partida donde se posicionará el texto [2].

2.2 Gestión gráfica en aplicaciones con interfaces vectoriales (Aplicaciones WPF)

Toda representación de objetos de las aplicaciones basadas en ventanas (la misma ventana, botones, cajas de texto, cuadros de diálogo, cajas de lista, botones de radio, cajas de chequeo, etc.), hecha sobre dispositivos como pantalla o impresora, son realizadas como imágenes *rasterizadas*.

Por esta razón es que el escalamiento presenta problemas porque debe ser calculado por el programador con los métodos correspondientes.

Las aplicaciones cuya interfaz se basa en gráficos vectoriales no tienen esa dificultad; ejemplos de estas aplicaciones son las Windows Presentation Foundation WPF y las aplicaciones vectoriales generadas por Adobe Animate CC, que pueden ajustar su interfaz automáticamente ante escalamientos en pantalla o impresora.

Las aplicaciones WPF tienen características heredadas de otras como las aplicaciones *Web*, de donde se ha tomado el lenguaje de meta etiquetas que en este caso es el que particularmente se llama XAML; las aplicaciones WPF se apropian las de técnicas utilizadas en el desarrollo de aplicaciones de Internet enriquecidas o Rich Internet Applications RIA y de algunos aspectos de las aplicaciones basadas en ventanas.

Las interfaces de las aplicaciones WPF están construidas con base en gráficos vectoriales ocupando menos espacio de almacenamiento, aunque puede utilizar imágenes *rasterizadas*.

El Control *Image* de estas aplicaciones es semejante al Control *PictureBox* de las basadas en ventanas, con la diferencia que en el caso que se le permita al usuario cargar una imagen externa en el control *Image*, se puede hacer esto combinando dos lenguajes, como por ejemplo C#, que permite al usuario seleccionar la imagen externa y XAML con el que se asigna en el Control *Image* el archivo seleccionado. Se pueden dibujar primitivas como las mencionadas para las aplicaciones basadas en ventanas, usando controles como *Canvas* o *Grid*.

Las aplicaciones WPF se destacan sobre las Windows Forms en que pueden crear animaciones de manera fácil. Estas animaciones son ejecutadas por los *Triggers* (disparadores o desencadenadores) de la misma manera como funcionan en las plataformas de desarrollo de videojuegos como Unity. Por ejemplo, un *Trigger* monitorea el estado *isMouseOver* en un objeto y podría desencadenar una animación si este estado pasa a verdadero.

La Figura 8 muestra la animación de un rectángulo delgado de color rojo girando como la manecilla de un reloj. En este caso el *Trigger* dispara la animación cuando ha sucedido el evento *Loaded*. Nótese que esta sencilla aplicación, no necesita que se escriba adicionalmente código subyacente en algún lenguaje de .NET.



Figura 8. Animación sencilla en una aplicación WPF

2.3 Gestión gráfica en aplicaciones basadas en fotogramas y línea de tiempo

El desarrollo de estas aplicaciones no solo requiere de conocimientos previos en programación orientada a objetos, sino que además se debe comprender los conceptos de película, fotograma y línea de tiempo. La plataforma Adobe Animate CC actualmente es líder en la producción de este tipo de aplicaciones pudiendo generarlas para sistemas operativos Windows, Linux (solamente hasta la versión 2.6 de Adobe AIR), Android y iOS. No genera aplicaciones nativas, pero basta construir una sola aplicación para que la misma pueda ser publicada para estos sistemas.

Esta plataforma corresponde a una migración de la antigua Flash que quedó obsoleta al ser rechazado su reproductor (intérprete de las aplicaciones generadas por Flash) FlashPlayer por varias compañías de software y hardware, por consumir excesivos recursos de los dispositivos. La empresa Adobe Systems Inc. generó una nueva tecnología llamada Adobe AIR que resolvió el problema de FlashPlayer.

Adobe® AIR® es un motor de ejecución multipantalla válido para todos los sistemas operativos que le permite aprovechar sus habilidades de desarrollo web para crear e implementar aplicaciones enriquecidas de Internet RIA en el escritorio y dispositivos móviles. Las aplicaciones de AIR móviles, de televisión y escritorio se pueden crear con ActionScript 3.0 utilizando Adobe® Flex y Adobe® Flash® (basado en SWF). Las aplicaciones de AIR de escritorio también se pueden crear con HTML, JavaScript® y Ajax (basado en HTML) [8].

Adobe Animate CC es considerado como un referente para producciones multimediales en 2D y aplicaciones multiplataforma. La gestión de gráficos es eminentemente vectorial pero también soporta formatos *rasterizados*. AIR es en el fondo un entorno de ejecución de aplicaciones para varios sistemas operativos. AIR interpreta en el sistema donde esté instalado archivos de extensión *.air* (formato intermedio). Este enfoque de entorno de ejecución es utilizado por muchas plataformas de aplicaciones, incluidas Java y .NET, y es el enfoque utilizado por Adobe AIR también. Cuando se utiliza un entorno de ejecución, el algoritmo de creación de la aplicación es:

1. Escriba el código en el idioma que prefiera.
2. Compile el código en un formato intermedio.
3. Ejecute el formato intermedio compilado en un entorno de ejecución [9].

Otra opción es empaquetar junto con la aplicación el motor de ejecución de AIR, para que ésta se ejecute como una aplicación de escritorio y el usuario no necesite instalar el entorno de ejecución AIR en el dispositivo.

La Figura 9 muestra el resultado de ejecutar una aplicación desarrollada con Adobe Animate CC, en lenguaje AS3 (ActionScript 3) y la parte principal de su código. Para mayor simplicidad, solo se ha utilizado un fotograma, dentro del cual se ha escrito el código necesario para que se dibuje dinámicamente una curva. Se declaran en el escenario (*stage*) oidores de eventos (escuchas de eventos o *listeners*) para *MouseDown*, *MouseMove* y *MouseUp* con el fin de modificar la curva interactivamente con el ratón.

La curva es construida sobre una instancia de la Clase *MovieClip*, la cual sirve también de contenedor gráfico, pero es posible hacer lo mismo usando una instancia de la Clase *Sprite*. Nótese que se dibuja directamente en el *movieclip* aplicando el método *curveTo* de la Clase *Graphics*. Este hecho facilita en estas aplicaciones la construcción en tiempo de ejecución de imágenes como diagramas estadísticos, figuras geométricas, etc.

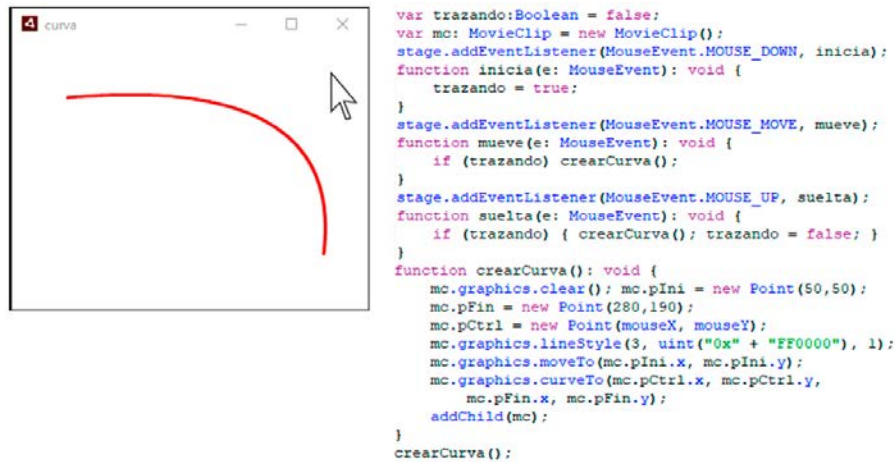


Figura 9. Trazo de una curva en Adobe Animate CC

3. TAREAS MÁS USUALES EN GESTIÓN GRÁFICA PARA APLICACIONES DE ESCRITORIO

Las aplicaciones que de una u otra manera en su ejecución tienen que hacer algún tipo de gestión gráfica, pueden realizar una o varias tareas principales de las que a continuación se describirán. Se analizarán estas tareas en los tipos de aplicaciones abordadas en este trabajo.

3.1 Mostrar imágenes externas

Los tipos de aplicaciones considerados en la sección anterior, es decir, aplicaciones basadas en ventanas, aplicaciones con interfaz vectorial y aquellas que están basadas en fotogramas y líneas de tiempo, gestionan la carga de imágenes externas de manera similar, ya sea de archivos incrustados o de archivos cargados por medio de un Uniform Resource Identifier URI.

La Clase *Bitmap* de la Biblioteca de Clases de .NET es utilizable para las aplicaciones basadas en ventanas y tiene muchos métodos para la gestión de imágenes *rasterizadas* como ya se ha anotado anteriormente. Esta clase permite manipular los píxeles de la imagen en memoria antes de trasladarla a un objeto visualizador. El objeto más común para visualizar imágenes en estas aplicaciones es el control *PictureBox*, en el cual la imagen *rasterizada* se asigna a la propiedad *Image*. El segmento de código en C# de la Figura 10 presenta la manera de mostrar mediante un botón, tres imágenes secuencialmente en un control llamado *ImagenPictureBox*.

```

// cambia la imagen cada vez que se hace clic en el botón siguiente imagen
private void siguienteButton_Click( object sender, EventArgs e )
{
    numImagen = ( numImagen + 1 ) % 3; // numImagen itera de 0 a 2

    // crea objeto Image del archivo, muestra en control PictureBox
    imagenPictureBox.Image = Image.FromFile(
        Directory.GetCurrentDirectory() + @"\imagenes\imagen" +
        numImagen + ".bmp" );
} // fin del método siguienteButton_Click
    
```

Figura 10. Carga de imágenes a un control PictureBox [5]

En las aplicaciones WPF, el control equivalente a *PictureBox* se llama *Image*. Existen varias formas de cargar una imagen *rasterizada* a estos controles, una de ellas es asignando al atributo *Source* un valor adecuado tal como se muestra en la Figura 11. Otro procedimiento de carga con código subyacente se explicará en ejemplos posteriores.

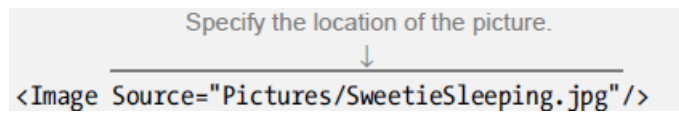


Figura 9. Propiedad Source del control Image [10]

En las aplicaciones WPF se puede utilizar transformaciones sobre un gráfico contenido en un objeto *Image* de manera directa, es decir aplicándolas al contenedor. Para ello se utiliza métodos *ScaleTransform*, *SkewTransform*, *RotateTransform*, etc. semejante a como ocurre en *Animate CC* con imágenes cargadas en algún contenedor. Si se requiere en el caso de las aplicaciones WPF, es posible trabajar los gráficos *rasterizados* con una clase semejante a la *Bitmap* mediante Bibliotecas de terceros referenciadas dentro del proyecto, como la biblioteca *C1Bitmap* [11]. Si la aplicación a desarrollar contempla tareas de solo mostrar archivos gráficos externos, cualquiera de los tipos de aplicación que se consideran en este escrito servirían para tal propósito.

3.2 Realizar dibujos o trazos sobre una imagen

Esto incluye renderizar texto sobre una imagen de mapa de bits cargada exteriormente. Para realizar este proceso los tres tipos de aplicaciones a las que se hace referencia en este trabajo tienen técnicas equivalentes. Las aplicaciones basadas en ventanas pueden usar un objeto *Bitmap* para cargar la imagen *rasterizada* y mostrarla sobre un objeto contenedor adecuado (*Form*, *PictureBox*, etc.).

Normalmente lo que se hace es tomar coordenadas locales de *mouse* sobre la imagen en el contenedor y con esta información dibujar una primitiva (línea, elipse, rectángulo etc.) sobre el bitmap cuando se disparen eventos: *MouseDown* usado para determinar el punto inicial de dibujo y *MouseUp* usado para determinar el punto final del dibujo.

Cuando se requiera previsualizar el trazo, se aprovecha el evento *MouseMove* para determinar un punto provisional del trazo y ejecutar el método *Refresh* del contenedor para que este a su vez, provoque el desencadenamiento del evento *Paint* del contenedor. Ahora solo queda repetir la instrucción de dibujo en un método asociado a *Paint*.

En la Figura 12 se muestra cómo se hace la previsualización de una línea (línea a trozos) mientras el ratón se mueve con el botón izquierdo hundido y a continuación, la línea definitiva (roja) cuando este botón es liberado. En el método asociado al evento *Paint* que dibuja la previsualización de la línea, se ha cambiado la propiedad *DashPattern* del objeto *Pen* con el que se dibuja la línea a trozos. En el caso del objeto *Pen* de las aplicaciones WPF esta propiedad se llama *DashStyle*.

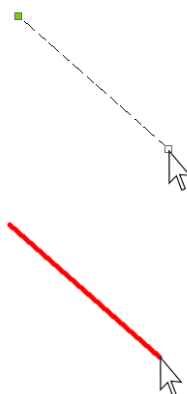


Figura 10. Previsualización de una primitiva

Esta técnica se puede utilizar para dibujar sobre una imagen *rasterizada*, la cual debe ser cargada en el contenedor que utilizará los métodos gráficos de dibujo. Tanto para las aplicaciones Windows Forms como para las WPF, el procedimiento es semejante, por lo cual se mostrará un solo ejemplo. La siguiente aplicación WPF carga una imagen a un objeto *Canvas* y aprovecha un único evento, el *MouseMove* para dibujar a mano alzada trazos rojos sobre la imagen de fondo. Esta técnica se utiliza para trazar otras

primitivas como elipses, rectángulos, curvas, figuras con relleno, etc. La Figura 13 muestra el resultado de trazos hechos con el ratón sobre la imagen, junto con su código XAML y el subyacente en C#.



Figura 11. Trazos a mano alzada sobre una imagen en aplicación Windows Forms

Hacer esta misma tarea con aplicaciones basadas en fotogramas y línea de tiempo es semejante a los dos tipos de aplicaciones anteriores. La Figura 14 muestra una aplicación desarrollada con Adobe Animate CC similar a la anterior. Para simplificar el ejemplo, la aplicación cuenta con un solo fotograma, un objeto de la Clase *Loader* donde se carga la imagen mediante un objeto *URLRequest*. El *loader* es adicionado al escenario en nivel 0 y los dibujos a mano alzada son adicionados en el nivel 1 para que se superpongan a la imagen. La posición Z más conocida como *Z Order*, se controla con el método *setChildIndex* [12]



Figura 12. Trazos a mano alzada en aplicación basada en fotogramas y línea de tiempo

3.3 Arrastrar y soltar imágenes

Este procedimiento es semejante a dibujar una primitiva interactivamente como en los ejemplos del numeral anterior, solo que, en vez de dibujar, se cambia las coordenadas del objeto contenedor de la imagen, ajustándolas de acuerdo con la nueva posición del ratón. El siguiente ejemplo de aplicación Windows Forms realiza la tarea de arrastrar y soltar una imagen cargada en un control *PictureBox*. De manera semejante se realizaría para una aplicación WPF. La Figura 15 ilustra las acciones de arrastrar y soltar de la imagen cargada en el control *PictureBox* y la parte principal del código C# donde se muestra el uso de los métodos *MouseDown*, *MouseUp* y *MouseMove* para realizar esta tarea.

Para las aplicaciones de Adobe Animate CC este procedimiento es un poco más sencillo, ya que existen los métodos *startDrag* y *stopDrag*, que permiten realizar estas acciones automáticamente sin necesidad de acudir al evento *Mouse_Move* para reposicionar el contenedor de la imagen calculando sus coordenadas. Esa es una diferencia sustancial respecto de las aplicaciones Windows Forms y WPF. La Figura 16 muestra el funcionamiento de esta aplicación, idéntico al de las otras.

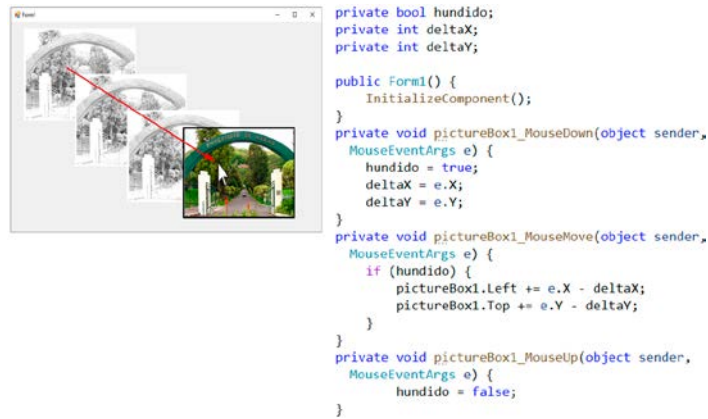


Figura 15. Acciones de arrastrar y soltar en una aplicación Windows Forms

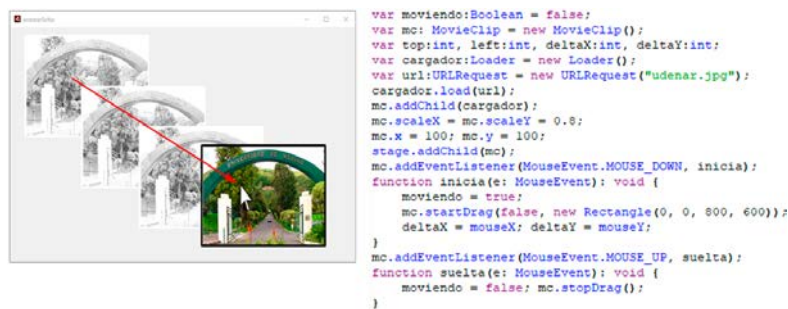


Figura 16. Acciones de arrastrar y soltar en una aplicación Adobe Animate CC

3.4 Aplicar transformaciones a imágenes

Las transformaciones lineales y afines, como ya se había anotado, se calculan multiplicando los vectores de las coordenadas de los píxeles por una matriz semejante a la mostrada en la Figura 7. Estas multiplicaciones las realizan los métodos automáticamente. Para comparar las programaciones requeridas en los tipos de aplicaciones objeto de este análisis, se tomará la transformación de Rotación en los tres ejemplos que siguen. La Figura 17 muestra una rotación de 20° aplicada a una imagen en una aplicación Windows Forms y la parte principal del código C#.



Figura 17. Rotación en una aplicación Windows Forms

Nótese que la imagen al rotar se recorta porque se sale de los límites del mapa de bits donde se aplicó la transformación. Para corregir este defecto, se debe calcular el nuevo tamaño del mapa de bits tomando como datos iniciales las dimensiones de imagen y el ángulo de rotación, tal como se ve en la Figura 18. En las aplicaciones WPF no se presenta este problema porque en ellas se puede rotar el control completo. En la Figura 19 se muestra una aplicación de funcionamiento idéntico a la anterior con las partes principales del código XAML y el subyacente en C#. En el ejemplo se carga una imagen en dos controles *Image* llamados *imagen1* e *imagen2*, en el segundo, se aplica una transformación de rotación de 20° en sentido horario.

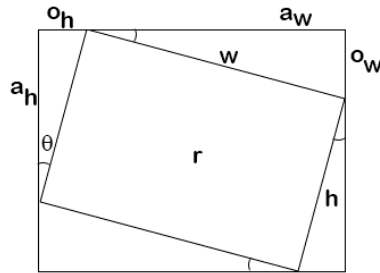


Figura 18. Cálculos trigonométricos del nuevo mapa de bits [13]

```

<Grid>
  <Label x:Name="label" Content="Imagen Original"
    HorizontalAlignment="Left" Margin="50,24,0,0"
    VerticalAlignment="Top"/>
  <Label x:Name="label1" Content="Imagen Rotada"
    HorizontalAlignment="Left" Margin="50,253,0,0"
    VerticalAlignment="Top"/>
  <Image x:Name="imagen1" HorizontalAlignment="Left"
    Height="240" Margin="40,63,0,0"
    VerticalAlignment="Top" Width="320"/>
</Image>
  <Image x:Name="imagen2" HorizontalAlignment="Center"
    Height="240" Margin="0,323,0,0"
    VerticalAlignment="Top" Width="320">
    <Image.RenderTransform>
      <RotateTransform CenterX="120" CenterY="120"
        Angle="20" >/RotateTransform>
    </Image.RenderTransform>
</Image>
</Grid>
public partial class MainWindow : Window
{
  public MainWindow()
  {
    InitializeComponent();
    BitmapImage bmp = new BitmapImage();
    bmp.BeginInit();
    bmp.UriSource = new Uri
      (Environment.CurrentDirectory +
        @"udenar.jpg");
    bmp.EndInit();
    imagen1.Source = bmp;
    imagen2.Source = bmp;
  }
}

```

Figura 19. Transformación de Rotación en WPF

Las aplicaciones basadas en fotogramas y línea de tiempo como las producidas por Adobe Animate CC funcionan muy parecido a las WPF, ya que pueden aplicar transformaciones directamente al contenedor de una imagen. En el ejemplo siguiente, debido a que la imagen se carga externamente, primero hay que hacerlo sobre un objeto *Loader* para luego añadirla al *movieclip*. La Figura 20 muestra la aplicación de Animate funcionando igual que la WPF.

```

var mc: MovieClip = new MovieClip();
var cargador:Loader = new Loader();
var url:URLRequest = new URLRequest("udenar.jpg");
cargador.load(url); mc.addChild(cargador);
mc.x = 40; mc.y = 50; addChild(mc);
var mcRotado: MovieClip = new MovieClip();
var cargador1:Loader = new Loader();
cargador1.load(url); mcRotado.addChild(cargador1);
mcRotado.x = 90; mcRotado.y = 370; addChild(mcRotado);
mcRotado.rotation = 20;

```

Figura 20. Rotación de una imagen en una aplicación Adobe Animate CC

3.5 Detectar colisiones entre imágenes

La detección de colisiones entre objetos es un aspecto sumamente importante en la producción de videojuegos.

Los componentes *Collider* definen la forma de un objeto para los propósitos de colisiones físicas. Un *collider*, el cual es invisible, necesita no estar con la misma forma exacta que el *mesh* del objeto y, de hecho, una aproximación a menudo es más eficiente e indistinguible en el juego. Los *colliders* más simples (y menos intensivos al procesador) son los llamados *primitive* (primitivos) tipos de *collider*. En 3D, estos son *Box Collider*, *Sphere Collider* y *Capsule Collider*. En 2D, usted puede utilizar el *Box Collider 2D* y *Circle Collider 2D*. Cualquier número de estos se pueden agregar a un solo objeto para crear *compound colliders* (*colliders* compuestos) [14].

En el caso de las aplicaciones Windows Forms para las colisiones entre objetos *PictureBox*, el *collider* natural sería el rectángulo que reporta la propiedad *DisplayRectangle* del objeto, solo que habría que convertirlo a un rectángulo con datos sobre la pantalla. La clase *Rectangle* provee un método *booleano IntersectsWith* que permite verificar si dos de ellos se están intersecando [15]. La Figura 21 muestra el estado en que los dos objetos *PictureBox* se encuentran separados y por tanto no existe colisión y el estado cuando se arrastra uno de los objetos *PictureBox* hasta intersecar su rectángulo con el correspondiente del otro objeto, detectándose la colisión.

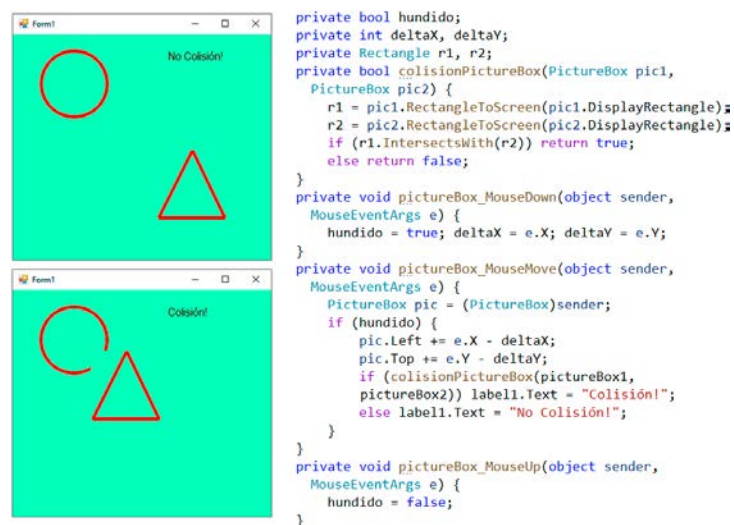


Figura 21. Dos objetos PictureBox si colisionar y colisionados

Nótese que a pesar de que las imágenes utilizadas son archivos Portable Network Graphics PNG con transparencias [16] y que la *PictureBox* que contiene la figura del triángulo tiene configurada la propiedad *BackColor* en el valor *Transparent*, este objeto no tiene zonas traslúcidas, pues se superpone como un parche sobre el otro objeto. Hacer que un control sea transparente es más complicado. Este control está mostrando el color de fondo del formulario.

Tanto los objetos de la clase *PictureBox* en estas aplicaciones como los de la clase *Image* en las aplicaciones WPF son rectangulares y un evento *Click* sobre ellos es detectado en cualquier parte de su área rectangular. Mediante código más complejo es posible detectar un evento *Click* solamente en una línea o forma lineal dibujada en él. En las aplicaciones WPF es posible hacer esto de manera más sencilla como se puede apreciar en el siguiente ejemplo. La Figura 22 muestra cómo se registra en la etiqueta las veces que se ha hecho clic exclusivamente sobre la línea roja.



Figura 22. Detección del evento Click sobre una línea

El código XAML que define los elementos de la interfaz es el mostrado en la *Figura 22* y la parte principal del código subyacente en C# se presenta en la *Figura 23*.

```

private int contador = 0;
private void canvas.PreviousMouseDown(object sender,
    MouseButtonEventArgs e) {
    Point posicionMouse = Mouse.GetPosition(canvas);
    AgregarInformacionPath(canvas, posicionMouse);
}
private List<DependencyObject> controlesEncontrados =
    new List<DependencyObject>();
public HitTestResultBehavior ResultadoSeleccion
    (HitTestResult result) {
    IntersectionDetail id = ((GeometryHitTestResult)
        result).IntersectionDetail;
    switch (id) {
        case IntersectionDetail.FullyContains:
        case IntersectionDetail.FullyInside:
        case IntersectionDetail.Intersects:
            controlesEncontrados.Add
                (result.VisualHit);
            return HitTestResultBehavior.Continue;
        default:
            return HitTestResultBehavior.Stop;
    }
}
}

private void AgregarInformacionPath(Canvas canvas,
    Point punto) {
    Point puntoTest = new Point(punto.X + 1, punto.Y
        + 1);
    var areaDeChequeo = new EllipseGeometry
        (puntoTest, 1, 1);
    controlesEncontrados.Clear();
    VisualTreeHelper.HitTest(canvas, null, new
        HitTestResultCallback(ResultadoSeleccion), new
        GeometryHitTestParameters(areaDeChequeo));
    if (controlesEncontrados.Count > 0 &&
        controlesEncontrados[0].ToString() ==
        "System.Windows.Shapes.Line") {
        contador++;
        if (contador == 1) label.Content = "Hizo Clic
            sobre la línea una vez";
        else label.Content = "Hizo Clic sobre la
            línea " + contador + " veces";
    }
    else label.Content = "No Hizo Clic sobre la
        línea";
}
}

```

Figura 23. Parte principal del código subyacente de la aplicación

Esta tarea como se puede ver no es tan fácil en las aplicaciones WPF y lo es mucho más en las aplicaciones Windows Forms. El siguiente ejemplo (*Figura 24*) tiene dos objetos *Canvas* que son cargados con las mismas imágenes del ejemplo mostrado en la *Figura 21*. En él, se ha provisto al objeto que contiene la figura del triángulo con la característica de ser arrastrable al utilizar los métodos *CanvasMouseLeftButtonDown*, *CanvasMouseLeftButtonUp* y *CanvasMouseMove*.

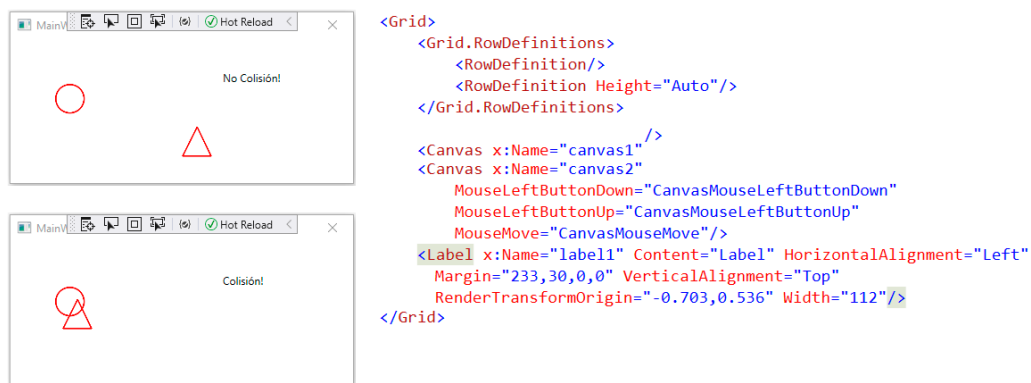


Figura 13. Colisión de imágenes en WPF y parte principal del código XAML

Se referencia anteriormente a que los contenedores gráficos de Windows Forms no son transparentes de manera directa, a pesar de cargar imágenes con zonas transparentes como se evidencia en la *Figura 21*. El presente ejemplo de colisión de imágenes en WPF, demuestra que en estas aplicaciones sus contenedores visuales si tienen esta característica verificable en la *Figura 24*. La parte principal del código subyacente de esta aplicación se muestra en la *Figura 25*.

```

private Image imagenArrastrable;
private Point posicionMouse, posActual;
private Vector diferencia;
private void CanvasMouseLeftButtonDown(object sender,
    MouseButtonEventArgs e) {
    Canvas can = (Canvas)sender;
    var image = e.Source as Image;
    if (image != null && can.CaptureMouse()) {
        posicionMouse = e.GetPosition(can);
        imagenArrastrable = image;
        Panel.SetZIndex(imagenArrastrable, 1);
    }
}
private void CanvasMouseLeftButtonUp(object sender,
    MouseButtonEventArgs e) {
    Canvas can = (Canvas)sender;
    if (imagenArrastrable != null) {
        can.ReleaseMouseCapture(); Panel.SetZIndex
            (imagenArrastrable, 0);
        imagenArrastrable = null;
    }
}

private void CanvasMouseMove(object sender,
    MouseEventArgs e) {
    Canvas can = (Canvas)sender;
    if (imagenArrastrable != null) {
        posActual = e.GetPosition(can);
        diferencia = posActual - posicionMouse;
        posicionMouse = posActual;
        Canvas.SetLeft(imagenArrastrable, Canvas.GetLeft
            (imagenArrastrable) + diferencia.X);
        Canvas.SetTop(imagenArrastrable, Canvas.GetTop
            (imagenArrastrable) + diferencia.Y);
        HitTestResult result = VisualTreeHelper.HitTest
            (canvas1, posicionMouse);
        if (result != null) label1.Content = "Colisión!";
        else label1.Content = "No Colisión!";
    }
}
private void Window_Loaded(object sender, RoutedEventArgs
    e) {
    var bitmap = new BitmapImage(new Uri
        (Environment.CurrentDirectory +
            @"\circunferencia.png"));
    var image = new Image { Source = bitmap };
    Canvas.SetLeft(image, 50); Canvas.SetTop(image,
        50);
    canvas1.Children.Add(image);
    bitmap = new BitmapImage(new Uri
        (Environment.CurrentDirectory +
            @"\triangulo.png"));
    image = new Image { Source = bitmap };
    Canvas.SetLeft(image, 150); Canvas.SetTop(image,
        100);
    canvas2.Children.Add(image);
}
}

```

Figura 14. Parte principal del código subyacente en C#

En contraste, en el siguiente ejemplo de aplicaciones basadas en fotogramas y línea de tiempo, se puede notar que es sumamente sencillo la detección de colisiones, pues se cuenta con el método *hitTestObject* que está creado para tal fin. En el ejemplo se han construido dos instancias de la Clase *MovieClip* llamadas *circulo* con propiedad de poder ser arrastrado y *rectangulo* que permanece estático en el escenario. La Figura 26 muestra la contabilización de colisiones cada vez que el círculo se arrastra y suelta sobre el rectángulo.

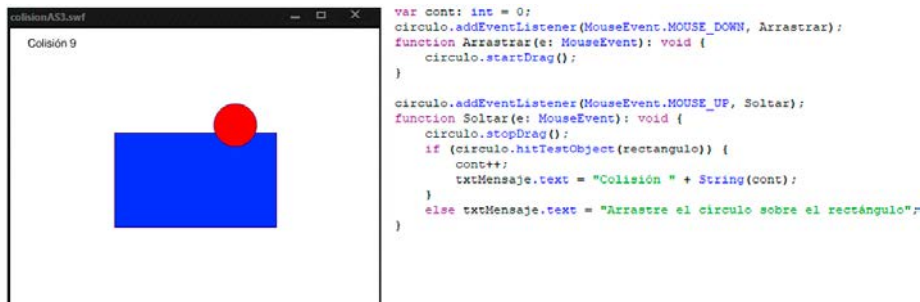


Figura 26. Detección de colisiones en Adobe Animate CC

4. CONCLUSIONES

Las aplicaciones Windows Forms conforman una de las tecnologías de desarrollo más populares hasta el momento en aplicaciones de escritorio; cuenta con mucho soporte y sitios de colaboración, aunque para algunos es una tecnología que está entrando en obsolescencia. La ventaja es que su curva de aprendizaje es menos empinada que la de las aplicaciones WPF y Adobe Animate CC.

Para las aplicaciones WPF se utiliza uno o dos lenguajes en su desarrollo, XAML para la construcción de la interfaz y en algunos casos muy particulares, la aplicación podría ser escrita con solo este lenguaje. Lo normal es que se defina la interfaz con XAML y se use otro lenguaje para escribir las clases y métodos propios, que se utilizarán para el funcionamiento de la aplicación, que se ha definido como código subyacente. Requiere aprender el XAML además de C# u otro lenguaje de los utilizados en .NET.

Los efectos gráficos que se pueden lograr con estas aplicaciones son inmensamente superiores a los de Windows Forms pero es más difícil de aprender a desarrollar aplicaciones WPF lo que sería su punto débil. Acostumbrarse a XAML no es difícil para una persona que tiene experiencia en POO con lenguajes como C#, Visual Basic, etc., ya que debe asimilar que insertar una etiqueta `<Image>` es como crear un nuevo objeto `new Image(...);` y que los elementos de la etiqueta `<Image Name="figura1" Width="300" Height="200" />` son las propiedades del objeto.

Adobe Animate CC es una plataforma poderosa para la generación de contenido multimedial en 2D y tiene la capacidad de desarrollar aplicaciones multiplataforma y aplicaciones web. Hay diversas opiniones sobre las dificultades de aprendizaje de la plataforma, para programadores que vienen de lenguajes tradicionales porque se deben acostumbrar al manejo de películas, fotogramas y líneas de tiempo.

Tiene esta plataforma una enorme ventaja frente a las otras con sus dos clases estrella, la Clase *Sprite* y la Clase *MovieClip* que hereda todo lo de la clase *Sprite* pero tiene además línea de tiempo. Se puede decir que una aplicación de Adobe Animate CC es una colección de objetos *Sprite* y *MovieClip* que interactúan entre sí.

Estas clases permiten una gestión gráfica puramente vectorial, con la posibilidad de manipular imágenes *rasterizadas*. Los objetos generados por estas clases pueden recibir transformaciones directamente y con código muy sencillo, las cuales afectan los gráficos contenidos en ellos haciendo que la gestión gráfica sea muchísimo más fácil, que en otro tipo de aplicaciones.

Es de anotar que se parte de la suposición que se pretende construir una aplicación que contiene tareas de gestión gráfica, para la cual no se cuenta en el momento con algoritmos escritos en un determinado

lenguaje de desarrollo, y lo que se quiere es, identificar el lenguaje y plataforma de acuerdo con las tareas de gestión gráfica que la aplicación va a realizar.

Teniendo en cuenta los diferentes ejemplos en cada una de las tareas principales que una aplicación con gestión gráfica puede hacer, se puede sugerir las siguientes recomendaciones para escoger la plataforma y lenguaje adecuados para el desarrollo:

- *Mostrar imágenes externas.* Para este caso de uso los tres tipos de aplicaciones son equivalentes, pues para cada una de ellas se cuenta con los métodos necesarios de carga y descarga de imágenes en archivos externos.
- *Realizar dibujos o trazos sobre una imagen rasterizada.* Se encuentra que este caso de uso es un poco complicado, pero no extremadamente difícil de desarrollar para aplicaciones Windows Forms y WPF. Con las aplicaciones de Adobe Animate CC, gracias a las clases *Sprite* y *MovieClip* es fácil de gestionar esta tarea con poco código.
- *Arrastrar y soltar imágenes.* No es un proceso complicado para ninguno de los tipos de aplicaciones analizados, pues todos cuentan con los métodos adecuados para realizar estas tareas. Hay una ventaja en las aplicaciones Adobe Animate CC gracias a su método *StartDrag*, que permite un control eficiente de la acción de arrastrar de manera sencilla, definiendo el área permitida para el arrastre. De esta manera es sumamente sencillo definir acciones de arrastre vertical y horizontal.
- *Aplicar transformaciones a imágenes.* Se complica estas tareas para las aplicaciones Windows Forms, pues ellas tienen que realizarse en memoria sobre un objeto *Bitmap* y en el caso de la rotación, se deben hacer cálculos trigonométricos para determinar el tamaño del bitmap resultante [12]. En las aplicaciones WPF y Adobe Animate CC no se presenta esta dificultad, pues en ambas las transformaciones se aplican a los objetos contenedores de manera directa.
- *Detectar colisiones entre imágenes.* Esta tarea no es sencilla de hacer en aplicaciones WPF y requiere de mucho código subyacente; no es complicado en las aplicaciones Windows Forms y es muy sencillo de gestionar para las aplicaciones Adobe Animate CC.
- *Construir imágenes en tiempo de ejecución.* En cualquiera de los tres tipos de aplicaciones analizadas, es sencillo construir gráficos en tiempo de ejecución. Se podría decir que hay algo de dificultad en las aplicaciones Windows Forms, donde se puede elaborar el gráfico sobre un objeto *Bitmap*, utilizando un objeto *Graphics* para su construcción, y luego asignarlo a un objeto de visualización como una *PictureBox*, pero se puede trabajar directamente sobre el objeto de visualización, utilizando un objeto gráfico obtenido de la propiedad *Graphics*, de un parámetro de tipo *PaintEventArgs*, en un método asociado al evento *Paint* del objeto de visualización.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia, "Microsoft .NET" Junio 2021. [Online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_.NET
- [2] L. Alemany de Aguinaga, V. Arias, A. Sánchez. *Depurador Declarativo para Plataforma .NET*. Madrid: E-Prints Complutense, 2008.
- [3] M. Chand. *Graphics programming with GDI+*. Boston: Addison-Wesley, 2004.
- [4] F. Ceballos. *Enciclopedia de Microsoft Visual C#*. México: Alfaomega Grupo Editor, 2006.
- [5] H. Deitel y P. Deitel. *Cómo programar en C#*. México: Pearson Educación, 2007.
- [6] I. Stirb, "Comparative Analysis of the Optimization Techniques of Image Filters Used to Improve Optical Character Recognition on Text Images" Semantic Scholar, Seattle, Corpus ID: 28943939, 2014.
- [7] A. Turtschi, DotThatCom.com, J. Werry, G. Hack y J. Albahari. *C# .NET Web Developer's Guide*. Rockland: Syngress Publishing, Inc., 2002.
- [8] Adobe Systems Inc., *Creación de aplicaciones de ADOBE AIR*, Adobe Systems Inc., 2017.
- [9] J. Lott, K. Rotondo, S. Ahn y A. Atkins. *Adobe AIR in action*. Greenwich: Manning Publications Co., 2008.
- [10] D. Solis. *Illustrated WPF*. New York: Apress, 2008.
- [11] ComponentOne, *Bitmap for WPF*, GrapeCity, Inc., 2020.

- [12] Adobe Systems Inc., *Programming ActionScript™ 3.0*, Adobe Systems Inc., 2007.
- [13] CodeProject, "Image Rotation in .NET" Junio 2021. Recuperado: <https://www.codeproject.com/Articles/3319/Image-Rotation-in-NET>
- [14] Unity Documentation, "Colliders" Junio 2021. Recuperado: <https://docs.unity3d.com/es/2018.4/Manual/CollidersOverview.html>
- [15] E. Brown. *Windows Forms Programming with C#*. Greenwich: Manning Publications Co., 2002.
- [16] PNG Development Group, *PNG (Portable Network Graphics) Specification, Version 1.2*, PNG Development Group, 1999.

Inclusión del adulto mayor en la era digital a través de herramientas tecnológicas enfocadas en teléfonos inteligentes

Edisney García Perdomo¹
Eilen Lorena Pérez²
María Fernanda Gasca Calderón³
Michael Herzen Conde García⁴
Nicolás Alberto Ibarra Gutiérrez⁵
Corporación Universitaria del Huila
Colombia

La realidad tecnológica actual y la nueva sociedad del conocimiento y de la información obliga a integrar en las prácticas cotidianas el teléfono celular, sin embargo, dados los diferentes rangos de edades de los usuarios, algunos no tienen conocimiento sobre ellos. Por tal motivo, esta experiencia se llevó a cabo para contribuir en el aprendizaje del manejo y uso correspondiente del teléfono inteligente, con la idea de ayudar a mejorar la calidad de vida de los adultos mayores a través de un curso didáctico desarrollado durante 25 semanas. En el curso se brindó acompañamiento progresivo, orientando diferentes temáticas divididas en tres unidades: 1) arquitectura del celular, enfocada a las gamas y reconocimiento de sus partes (batería, micrófono y altavoces incorporados, características del teclado, cámara, flash, Sim Card, sensor de proximidad, botones externos, puerto de carga, auriculares); 2) interfaz de usuario, correspondiente a la barra de estado, menú de aplicaciones, ajustes rápidos, panel de notificaciones, conectividad a red WIFI e identificación y configuración; y 3) aplicaciones móviles, que integra redes sociales como WhatsApp y Facebook. Participaron 60 adultos mayores con edades entre 47 y 90 años y la investigación se apoyó en una metodología cuantitativa y cualitativa. Por tal motivo se aplicaron dos cuestionarios: el primero para indagar el uso y las dificultades a la hora de manipular el celular, y el segundo para evidenciar la apropiación de esta herramienta tecnológica al recibir las capacitaciones impartidas. A manera de conclusión se puede resaltar que los adultos mayores desarrollaron nuevas prácticas de comunicación, capacidad e interés para mantener una vida activa y participativa, además, vencer el estereotipo de la complejidad en el acceso y uso del teléfono. De esta manera se abre una brecha a nuevos espacios de inclusión tecnológica que contribuyan a su propio bienestar y a no depender de terceros a la hora de utilizar los teléfonos inteligentes.

¹ Ingeniera de Sistemas y Magíster en Gestión de la Tecnología Educativa.

Contacto: edisney.garcia@corhuila.edu.co

² Ingeniera de Sistemas y Magíster en Tecnologías de la Información Aplicadas a la Educación.

Contacto: eilen.perez@corhuila.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería de Sistemas vinculada al semillero NTIC.

Contacto: m-gascac@corhuila.edu.co

⁴ Estudiante de Ingeniería Mecatrónica vinculado al semillero NTIC.

Contacto: mhconddeg@corhuila.edu.co

⁵ Estudiante de Ingeniería de Sistemas vinculada al semillero NTIC.

Contacto: na_ibarra@corhuila.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información y comunicación TIC son una herramienta útil para los diferentes aspectos y ámbitos de la sociedad en la vida diaria como, por ejemplo, la educación y aprendizaje en donde las nuevas generaciones asimilan de manera natural esta actual cultura e incursionan progresivamente en la transformación digital [1]. Es así como las TIC han demostrado ser un fuerte pilar para las metodologías de las enseñanzas enfocadas a nuevas tecnologías como el teléfono inteligente, el cual es un instrumento útil que ha logrado incrementar la eficiencia y eficacia en las actividades, por ende, aprender el manejo básico del celular se ha convertido como logro para la inclusión digital [2].

Respecto a las personas que se encuentran en los rangos de edades con ciclo de vida clasificados en adultez y adulto mayor reflejan una mayor complejidad a la hora de aprender herramientas tecnológicas, según la Organización Mundial de la Salud OMS, el Adulto Mayor es aquella persona que supera los 65 años. Sin embargo, en la legislación colombiana específicamente en la Ley 1276 de 2009, es considerado adulto mayor a aquella persona que cuente con 60 años [3]. Cabe destacar que el envejecimiento es un proceso biológico que inicia asociado con el nacimiento mismo y que conlleva a transformaciones fisiológicas, como la reducción en sus capacidades físicas, psicológicas y autonomía, esto es ampliamente aceptado [4].

En Colombia las estadísticas reflejan un aumento masivo en la incursión a las comunicaciones móviles acercándose a los estándares internacionales, evidenciando que el 50% de los celulares que tienen los colombianos son teléfonos inteligentes donde el número de dispositivos conectados con tecnología 4G en el país es de 60,83 millones, también se afirma que el consumo de mensajería por medio de texto se redujo en un 50% reemplazada por aplicaciones como WhatsApp, Telegram, entre otras [5].

A pesar de tener un crecimiento en el uso de las telefonías móviles e incursión masiva esto no ha aplicado lo suficiente a la población del adulto mayor, ellos presentan poca conexión con la tecnología llevándolos a un estado de aislamiento tecnológico y familiar por el desconocimiento del uso adecuado del teléfono.

El ministerio de las TIC extienden la importancia de incursionar paulatinamente a la población del adulto mayor en el uso de estos dispositivos permitiéndoles superar sus complejos y elevar su autoestima; otros responden a necesidades más concretas y así fomentar las relaciones intergeneracionales, puesto que descubren intereses comunes con sus familiares más jóvenes, permitiéndoles pasar con ellos más tiempo, mantenerse actualizado en la red, brindar comunicación con sus amigos cercanos y buscar información de interés [6]. Esto conlleva a que esta población esté activa y se sienta parte de la comunidad en el ámbito tecnológico [7].

La alcaldía de Neiva da la cara a la promoción del envejecimiento activo, haciendo partícipes a esta población para la incursión digital y manejo de nuevas herramientas tecnológicas, evidenciando el compromiso de algunas entidades públicas y privadas [8]. La Agencia Cultural del Banco de la República y la Corporación Universitaria del Huila CORHUILA quienes se encuentran comprometidas trabajando con la inclusión tecnológica a través de talleres y capacitaciones, donde a su vez participan nuevas generaciones de jóvenes influyentes que comparten sus conocimientos en la formación, adaptación y capacitación para favorecer en el proceso de orientación, enseñanza y aprendizaje a los adultos mayores hacia el sentido de buscar y promover la participación de esta población.

2. MARCO REFERENCIAL

Las Tecnologías de la información y comunicación es la protagonista de grandes cambios buscando una mejor productividad en la agricultura, industria, educación, comercio, salud generando un impacto económico y social que contribuyen al desarrollo del país [9]. Este término hace parte de la transformación de la sociedad a lo largo de los últimos años, contribuyendo en la aparición de tecnologías emergentes relacionadas al procesamiento y almacenamiento de la información, analizando gran cantidad de datos en el menor tiempo posible, dando paso a avances computarizados que en antaño solo eran posibles manualmente de manera dispendiosa en mano de obra y uso de mayor tiempo al momento de ejecutar actividades [10].

Esta surge a medida que emerge y crece la internet permitiendo generar una gran revolución tecnológica sin precedentes haciendo relevancia a la información y la manipulación de la misma, en el ámbito de las comunicaciones es un fuerte pilar porque sin importar la distancia o lugar dos personas o más pueden estar conectadas, este acercamiento por medio tecnológico crece aún más con la aparición de las Tablet y los primeros teléfonos inteligentes, estas apariciones al tener gran influencia en la sociedad contribuye al avance de la misma generando nuevas oportunidades e innovación en todos los sectores; culturales, económicos, educativos, industriales, entre otros [11].

En 1997, Nokia lanzó el primer teléfono inteligente conocido como *Nokia 9000i*. Este abrió brecha a nuevos modelos y competencia entre marcas, precios y nuevas aplicaciones. La evolución permitió disminuir sus tamaños y pesos reflejándose en lo más actuales con versiones más compactas y mayores de prestaciones de servicio. Inicialmente permitían solamente recibir llamadas de voz y enviar mensajes de texto, a medidas que crecen versiones y nuevas actualizaciones se incluyen aplicaciones como juegos, alarmas, calculadores y una de las más importantes el acceso WAP (acceso a internet mediante páginas web diseñada para los móviles) [12].

El teléfono inteligente es un gran ejemplo para el cambio generacional donde en menos de 50 años la comunicación pasó de ser lenta a pasar prácticamente instantánea, a su vez permite generar espacios de recreación como multimedia, entretenimiento (redes sociales), compras y pagos [13]. Es así como la tecnología ha incursionado en la vida diaria del ser humano, siendo los jóvenes quienes generan mayor consumo y hábitos relacionados con su dependencia a esta herramienta, pero existe un grado de diferencia entre las personas de mayor edad siendo los más rezagados al cambio y uso de la tecnología.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos OCDE, la población del adulto mayor ha aumentado su esperanza de vida lo cual hace que los gobiernos cambien sus políticas para aumentar la edad en las diferentes oportunidades laborales, como, trabajos que incluyan el manejo de aplicaciones tecnológicas y herramientas como el teléfono inteligente, permitiéndoles ser parte de la economía activa y a su vez ellos mismos generen sus propios recursos y sentir que contribuyen al desarrollo de la sociedad. Por tal motivo, este organismo promueve el envejecimiento activo.

La promoción del envejecimiento activo implica la optimización de todas esas condiciones a través de intervenciones biomédicas, físicas, psicológicas, socio-ambientales y, sobre todo, educativas. Hemos de subrayar así mismo que la promoción del envejecimiento activo supone prevenir la enfermedad y la discapacidad y mejorar el bienestar y la calidad de vida en la vejez [14]. Desde un enfoque gerontológico la mayoría de las personas pueden aspirar a vivir más de los 60 años, según investigaciones realizadas sobre la neurobiología vienen demostrando que el cerebro tiene capacidad de modificarse continuamente, pero los adultos mayores no cuentan con estímulos que los motive a adquirir nuevos conocimientos, esto depende del interés y motivación personal.

A diferencia de los niños, que viven constantemente rodeado de personas que les generan nuevos estímulos y permanecen en constante aprendizaje. Esto demuestra que las personas mayores tienen oportunidad de desarrollar apropiadamente sus capacidades personales a través de la educación, contribuye no solo a prevenir situaciones de dependencia, sino que faculta para el desarrollo de un envejecimiento más pleno [15].

Las intervenciones de Educación dirigidas a este colectivo proporcionan un conjunto de herramientas que acrecienta la capacidad personal y favorece la adopción de actitudes críticas sobre los determinantes que inciden en la evolución del proceso de envejecimiento como construcción sociocultural [16].

3. MÉTODO

El presente estudio se enfocó en una investigación tipo descriptivo y transversal con una combinación de métodos cuantitativos y cualitativos; participaron 60 adultos mayores de la ciudad de Neiva. La selección de la muestra fue no probabilística, dada que fue participación voluntaria de los adultos mayores que frecuentaban la biblioteca del Banco de la República de la Ciudad de Neiva, adicionalmente se realizó la

convocatoria por medio de la página WEB de la Agencia Cultural, la voz a voz (sugerencia de un tercero), correo electrónico, medios de comunicación y organismos locales (periódicos regionales), con edades comprendidas en rangos entre 47 y 90 años. La media de edad total de la muestra fue de 71 años.

Las capacitaciones fueron impartidas de forma presencial y asistidas por tecnologías a través de presentaciones realizadas en Prezi, PowerPoint y la aplicación móvil *ScreenStream*; material didáctico y talleres dirigidos y guías *paso a paso* para practicar y reforzar desde casa. La duración de cada sesión de trabajo fue de 4 horas durante 25 semanas. El único requisito era disponer de un dispositivo móvil y de conectividad.

3.1 Unidades temáticas de las capacitaciones

- *Unidad 1.* Aspectos generales del celular inteligente: el objetivo es identificar el concepto, funcionalidades y la arquitectura física del celular inteligente. Destacando las gamas, batería, micrófono, altavoces cámara, flash, sim card, sensor de proximidad, botones externos, puerto de carga y puerto de auriculares.
- *Unidad 2.* Interfaz de usuario: su objetivo se centra en conocer la forma de interactuar con la pantalla: la barra de estado, menú de aplicaciones, panel de notificaciones, contactos, bluetooth y configuraciones generales.
- *Unidad 3.* Aplicaciones: se hace referencia al manejo de las aplicaciones integradas al celular y cómo se pueden obtener nuevas por medio de la tienda PlayStore. Se socializaron los siguientes temas: redes sociales (WhatsApp y WhatsApp WEB, Facebook, YouTube), manejo del correo electrónico, navegadores de internet, cámara, realización de video, juegos, bloc de notas, calendario, reloj (cronometro y temporizador), contactos, bluetooth, capturas de pantalla, entre otras

Los instrumentos empleados para la recopilación de información de carácter sistemático fueron dos cuestionarios: el primero denominado prueba diagnóstica permitió evaluar el conocimiento y usabilidad del celular inteligente; y las dificultades al manejar este dispositivo por parte de los adultos mayores, con respuestas dicotómicas, abiertas y de grado de frecuencia.

Este cuestionario se diseñó a partir de la revisión y adaptación de otros ya existentes como la encuesta INMA [17] y fue validado por tres expertos en tecnologías de la información aplicadas a la educación. Cada pregunta con un estilo de redacción sencillo, de modo que no se requirieran grandes destrezas informáticas, ni un nivel educativo alto para su entendimiento.

El segundo instrumento, se aplicó después de las capacitaciones y se denominó postest con el objetivo de analizar la apropiación del celular inteligente para su calidad de vida, teniendo como categoría: la comunicación e interacción social, entretenimiento, aplicaciones para facilitar actividades diarias.

La descripción de los datos cualitativos se realizó en forma de triangulación de las categorías y los datos cuantitativos se organizaron mediante frecuencias.

Al finalizar todo el curso, los adultos mayores deberán emplear sus conocimientos y hacer entregable final este consiste en realizar un collage como proyecto final con fotos tomadas propiamente desde sus teléfonos inteligentes sobre sitios turísticos, monumentos o paisajes del Departamento del Huila y este tendrá que ser hecho mediante el uso de una aplicación móvil.

Adicionalmente durante el desarrollo del curso se realizaron cinco talleres prácticos correspondientes a cada una de las unidades temáticas, los cuales eran evaluados por medio del método de la observación que identifican el desempeño para cada uno de los participantes acerca de lo aprendido en las sesiones y quienes presentaban dificultades se les realizaban refuerzos de forma personalizada, logrando aclarar la duda con la orientación de los contenidos temáticos.

3.2 Diagnóstico Inicial

El formulario de la Tabla 1 se aplica a la población inscrita inicial para conocer y analizar los conocimientos previos que presentan en el manejo y conceptos básicos del teléfono inteligente.

Tabla 1. Preguntas del diagnóstico inicial

Categoría	Pregunta	Opciones de respuesta	
En Nivel de conocimiento y usabilidad Conocimiento	¿Conoce el concepto de un celular inteligente?	Dicotómica	
	Indique cuales son las utilidades que se le pueden dar a las aplicaciones móviles	Pregunta abierta Estar en contactos con familiares y amigos Entretenimiento Estar informados Salud y Bienestar	
	Porcentaje de uso del celular inteligente	Nunca Casi nunca Ocasionalmente Casi todos los días Todos los días	
En Nivel de conocimiento y usabilidad Conocimiento	Para cada actividad realizada en el celular inteligente, seleccione la frecuencia de uso:		
	Hacer llamadas		
	Enviar mensajes de texto		
	Revisar el correo electrónico		
	Chatear		
	Navegar en internet	Nunca	
	Tomar fotos	Casi nunca	
	Hacer videos	Ocasionalmente	
	Descargar aplicaciones	Casi todos los días	
	Escuchar música	Todos los días	
Dificultades	Cuáles son los principales problemas que han tenido con el celular inteligente:		
	Miedo a dañarlo		
	Es cansancio para la vista		
	Es muy sensible		
	Es confuso		
Comunicación e Interacción social	No tengo internet todo el tiempo	Respuesta abierta	
	Puedo comunicarme por video llamadas con seres queridos, amigos o conocidos	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Conozco la forma de enviar mensajes de texto	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Identifico las diferentes formas de acceder a las redes sociales	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Considero que el celular inteligente me provee compañía en mi día a día	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Tengo claridad a la hora de crear y acceder a un correo electrónico	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Tengo conocimiento de la forma de tomar fotos	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Sé cómo Navegar en internet	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo	
	Entretenimiento	Puedo ver y hacer videos con el celular inteligente	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo
		Conozco la forma de escuchar música	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo
Puedo jugar en el celular inteligente		Totalmente en desacuerdo En desacuerdo	

		Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo
	Conozco cómo acceder a la computadora	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo
Aplicaciones para facilitar actividades diarias.	Conozco cómo programar una alarma	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo
	Conozco cómo ingresar a buscar información de interés	Totalmente en desacuerdo En desacuerdo Ni de acuerdo ni en desacuerdo De acuerdo Totalmente de acuerdo

3.3 Posttest: Diagnóstico final

El cuestionario de la Tabla 2 se aplica a los adultos mayores en la última sesión de clase, para comparar y verificar los temas con más relevancia de aprendizaje y los que se les debe hacer más énfasis.

Tabla 2. Preguntas posttest diagnóstico

Preguntas	Respuestas	Selección
¿Cuál es el nombre del espacio en pantalla que refleja las notificaciones y accesos directos a las configuraciones básicas del teléfono?	Barra de menú	
	Panel de notificaciones	
	Barra de estado	
	Barra de iconos	
Es necesario conocer la dirección de correo electrónico de la otra persona para enviarle un mensaje desde Gmail	SI	
	NO	
¿Cuáles son los tipos de conectividad presentes en el Smartphone?	Wifi	
	Bluetooth	
	NFC	
	Datos móviles	
	Encender pantalla	
¿Cómo se llaman las funciones encontradas al momento de deslizar la barra de estado?	Cámara	
	Guardar contacto	
	Subir o bajar	
	Funciones de atajo	
	Funciones de conectividad	
	Funciones múltiples	
¿Qué datos son necesarios para almacenar un contacto en el celular?	Funciones de notificación	
	Nombre y número de celular	
	Dirección de correo electrónico	
	Nombre e imagen de perfil	
	Solo nombre	

Teniendo como revelación el tipo de población capacitada, se tuvo en cuenta el uso verbal y expresión corporal a la hora de explicar las temáticas y dirigirse a ellos, por eso se estudió y se implementó la metodología especializada, conocida como la andragogía que sirvió de guía a los docentes el cómo dirigirse y compartir sus conocimientos, que desde el inicio de la investigación se impartió como pilar para planificar los contenidos temáticos y la forma para estructurar los talleres, esta es la *Andragogía de Malcolm Knowles* que nos informa los principios del aprendizaje en los adultos [18]: A) El adulto cuenta con un gran recurso de aprendizaje, por su experiencia; B) La rapidez del aprendizaje de un adulto dependerá de la relación con el desarrollo de la tarea en su rol social; y C) Como persona madura, espera que las aplicaciones sean inmediatas.

4. RESULTADOS

La prueba diagnóstica, presentó dos categorías de análisis: Nivel de conocimiento y usabilidad del celular inteligente; y las dificultades en su manejo. El 73% de los adultos mayores tienen un grado débil y muy débil en la explicación del término *celular inteligente* y el 77% presenta dudas en su connotación, y funcionamiento (Figura 1).

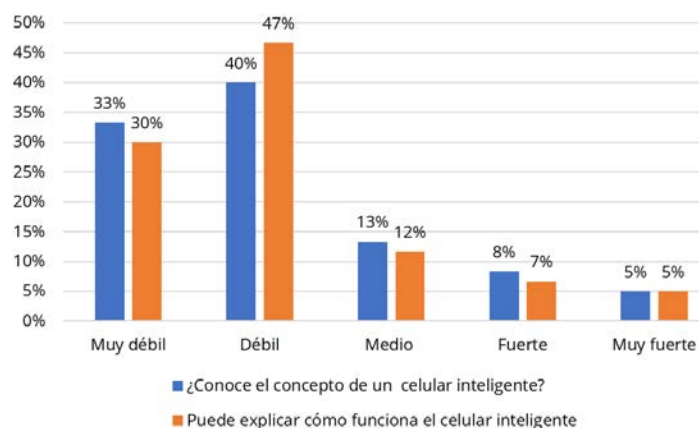


Figura 1. Conocimiento sobre el concepto y funcionamiento del celular inteligente

La Figura 2 muestra el conocimiento con relación a las utilidades que se le puede dar al celular inteligente, donde un 75%, lo relacionan con estar en contacto con familiares y amigos. 16% entretenimiento, 5% estar informados y un 3,3% para su salud y bienestar.

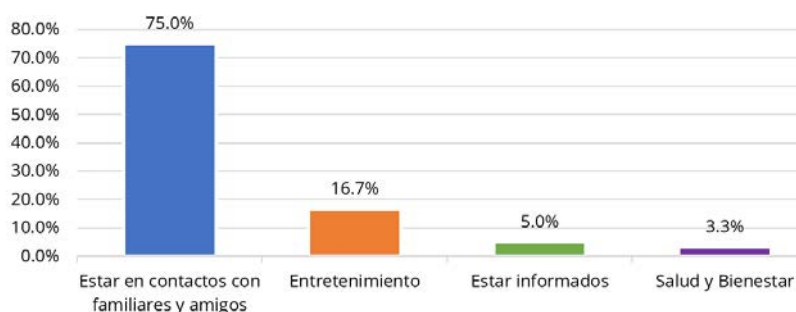


Figura 2. La utilidad de las aplicaciones móviles

En cuanto a los porcentajes del uso del celular inteligente por parte de los adultos mayores se puede apreciar en la Figura 3 que la mayoría de los encuestados se sitúan en la opción *casi nunca* y *nunca* con un 66,7%, lo que significa que los adultos mayores no han logrado tener un acercamiento con ese dispositivo electrónico de forma concurrencia, en el nivel *ocasionalmente* presenta un valor de 30,0% y un 16,7% lo usa con más duración casi todos los días a todos los días. Estos valores, resalta la poca integración o adaptación en las actividades diarias.

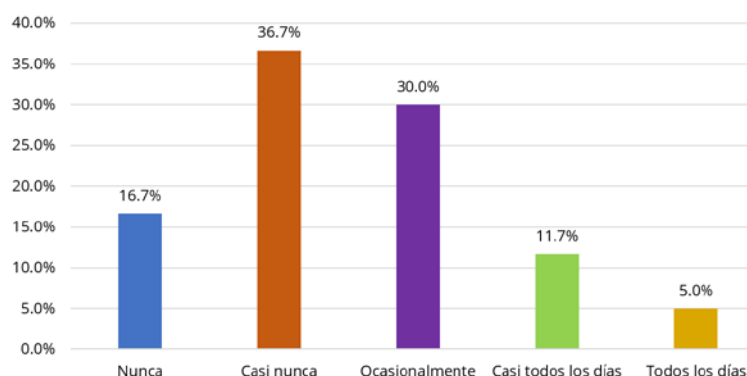


Figura 3. Porcentaje de uso del celular

De acuerdo con las diferentes formas o actividades en las que los adultos mayores emplean el celular inteligente (Tabla 3), se determina que hacer llamadas es la actividad de mayor demanda, donde un 50% lo hacen *casi todos los días* y un 28% hacen llamadas *todos los días*. Seguidamente la actividad con mayor acogida por los adultos mayores es chatear con un porcentaje de *ocasionalmente* de un 12%, *casi todos los días* un 43% y *todos los días* con un valor de 45%.

Respecto a las actividades que nunca o casi nunca realizan los adultos mayores se sitúan descargar aplicaciones (97%), hacer videos (91), jugar (97%), Manejar el calendario/agenda (86%), revisar el correo

electrónico (77%), navegar por internet (72%) enviar mensajes de texto (70%) y editar notas (70%). Las actividades que corresponden a tomar fotos, escuchar música y manejar contactos, se muestra que ocasionalmente la realizan, con valores del 70%, 43% y 50% respectivamente.

Tabla 3. Actividad realizada en el celular inteligente

Actividad	Nunca	Casi nunca	Ocasionalmente	Casi todos los días	Todos los días
Hacer llamadas	2%	5%	15%	50%	28%
Enviar mensajes de texto	32%	38%	17%	8%	5%
Revisar el correo electrónico	50%	27%	17%	5%	2%
Chatear	13%	15%	12%	43%	15%
Navegar en internet	42%	30%	13%	10%	5%
Tomar fotos	7%	20%	70%	3%	0%
Hacer videos	58%	33%	8%	0%	0%
Descargar aplicaciones	67%	30%	3%	0%	0%
Escuchar música	13%	20%	43%	13%	10%
Jugar	50%	37%	10%	2%	2%
Editar notas	33%	37%	30%	0%	0%
Manejar el calendario/agenda	63%	23%	10%	3%	0%
Manejar contactos	20%	20%	50%	7%	3%

Por otra parte, la Figura 4 relaciona la categoría dificultades a la hora de usar el teléfono donde se destaca el desconocimiento con 85%, confuso con un 80%, miedo a dañarlo con un 66,7%, cansancio visual con un 50,0%, problemas de conectividad con un 41,7% y la sensibilidad del dispositivo con 30,0 %.

Este apartado, resalta la importancia de formar poco a poco a los adultos mayores sobre los principales beneficios del celular inteligente, e ir acabando los prejuicios, como volverse dependiente, al no tener conocimientos del uso esto puede provocar alguna alteración en el sistema, solo se usa para llamadas, entre otras.

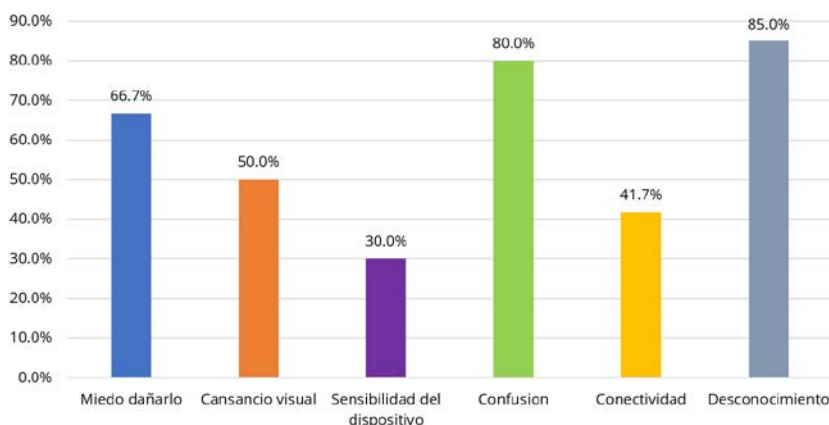


Figura 4. Dificultades de uso del celular Inteligente

La dimensión Comunicación e Interacción social del cuestionario postest registrada en la Tabla 4, evidencian que los adultos mayores presentaron grandes beneficios a la hora de trabajar las temáticas. Por ejemplo, para comunicarse por video llamadas con seres queridos amigos o conocidos obtuvo una media de 4,35 considerada por los investigadores un valor muy alto en una escala de 1 a 5, siendo 1 el menor valor y 5 el valor máximo.

Las medias para las preguntas Conozco la forma de enviar mensajes de texto, Identifico las diferentes formas de acceder a las redes sociales, Tengo claridad a la hora de crear y acceder a un correo electrónico, arrojan valores casi iguales entre 4,02 y 4,05.

La única pregunta que tiene una media aceptable es para la pregunta Considero que el celular inteligente me provee compañía en mi día a día con un valor de 3.9. Es notorio que la mayoría de los resultados obtenidos se concentran cerca a la media aritmética, sustentándose en la desviación estándar encontrada, donde hay poca variabilidad entre los elementos de la muestra, dados los valores entre 0.46 y 0.633.

Tabla 4. Análisis de medias de la dimensión Comunicación e Interacción social del postest

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Puedo comunicarme por video llamadas con seres queridos, amigos o conocidos para superar el conflicto entre el gobierno colombiano y la guerrilla de las FARC	60	3	5	4,35	,633
Conozco la forma de enviar mensajes de texto	60	3	5	4,05	,467
Identifico las diferentes formas de acceder a las redes sociales	60	3	5	4,03	,551
Considero que el celular inteligente me provee compañía en mi día a día	60	3	5	3,90	,543
Tengo claridad a la hora de crear y acceder a un correo electrónico	60	3	5	4,02	,469
N válido (según lista)	60				

La Tabla 5, precisa la dimensión de entretenimiento del postest compuesta por las preguntas: Tengo conocimiento de la forma de tomar fotos, Sé cómo Navegar en internet, Puedo ver y hacer videos con el celular inteligente, Conozco la forma de escuchar música; Puedo Jugar en el celular inteligente, se observan que las medias no sobrepasan el 4,42 siendo un valor alto, ya que el rango va de 1 a 5,0.

Tabla 5. Análisis de medias de la dimensión de entretenimiento del postest

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Tengo conocimiento de la forma de tomar fotos	60	3	5	4,42	,561
Sé cómo Navegar en internet	60	3	5	4,03	,410
Puedo ver y hacer videos con el celular inteligente	60	3	5	4,10	,573
Conozco la forma de escuchar música	60	3	5	4,10	,440
Puedo Jugar en el celular inteligente	60	3	5	4,07	,516
N válido (según lista)	60				

Tomando en cuenta los valores de esta categoría se demuestra que los adultos mayores se sintieron identificados con el entretenimiento, porque les brinda la oportunidad de aprovechar su tiempo libre utilizando las diferentes aplicaciones que suministra el teléfono inteligente y a su vez ir complementando y mejorando el uso del teléfono, con van obteniendo más seguridad y evidenciando lo aprendido en las sesiones, adicional esto genera inquietudes o dudas que pueden llegar a ser compartidas durante el desarrollo de la capacitación realizando una retroalimentación para todo el grupo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos confirman que la población estudiada le da más utilidad al celular inteligente para hacer llamadas, esta afirmación se sustenta con el poco nivel de conocimiento que se tiene sobre las funcionalidades de este dispositivo electrónico. Sin embargo, se puede asociar que chatear también es una actividad de gran acogida, pero en menor proporción, se dificulta a la hora de digitar la información pues sus dedos se traban en el teclado o presentan problemas óseos y les impide teclear con agilidad, por lo tanto, realizan esta actividad mediante las notas de voz.

A nivel social, el uso correspondiente del celular inteligente resulta tener ventajas para los adultos mayores, porque permite mejorar hábitos de vida, como interactuar con amigos o conocidos por medio de las aplicaciones de mensajería o llamada, compartir con sus familias información de interés, comunicarse con ellos por los mensajes de texto grupales o video-llamadas, actualizaciones de logros, cumpleaños y fecha especiales que les permite estar participando y acompañando todos estos eventos en tiempo real.

Por otra parte, al pasar los años se pierde movilidad en la realización de actividades, pérdida de memoria, problemas en el uso de lenguajes, desorientación entre otros; en algunos casos se requiere de cuidadores para que su ministren los medicamentos a la hora exacta, hoy contamos con aplicaciones internas del teléfono móvil que les permite a ellos el teléfono para que este vibre o emita un sonido, a esto en los contenidos temáticos se entiende como reloj, cronometro, temporizador, esta es una herramienta fundamental para ellos, porque les ayuda a programar y recordar hora de tomar su medicamento, funcionalidades como estas, les brinda a esta población mantener parte de su independencia.

Es aquí la importancia de mantener canales de aprendizaje en alfabetización tecnológica en el uso de nuevas tecnologías, motivar e incursionar a los adultos mayores a saber dominar ciertas aplicaciones móviles y adicional WEB, como herramientas ofimáticas, generar correos electrónicos desde los ordenadores, entre otras. Esto para que les permita mantener y sentirse activos, comprendiendo y recuperando parte de su independencia con sentido de auto-competencia, tan fundamental en todas las etapas de la vida en especial cuando se llega a la longevidad acompañada de la prevalencia de morbilidad.

6. CONCLUSIONES

Podemos concluir que el curso del manejo básico del celular inteligente impartió gran interés y motivación a la población del adulto mayor, en donde se sostuvo una participación alta durante las 25 semanas, demostrando que esta población en la ciudad de Neiva se encuentra siendo parte de la transformación digital y mantenerse en su incursión a la nuevas brechas digitales, para ellos fue de suma importancia reconocer su propio celular porque se promovió a que sigan enfocados en conocer nuevas herramientas u otro tipos de talleres que ofrece el Banco Cultural de la Republica de la ciudad de Neiva de la mano con la Corporación Universitaria del Huila.

Durante el desarrollo de la investigación se evidencia que la técnica de enseñanza es un factor de gran importancia, buscando promover los medios tecnológicos, como aplicaciones gratuitas, en este caso como *ScreenSteam*, *WhatsApp* que brinda una mejor visualización de la pantalla de los celulares y ayuda por vía internet una mejor comunicación a los adultos mayores acerca de las funcionalidades del teléfono inteligente en el cual les permite estar preparados para el futuro.

Se logró identificar que la metodología Andragogía parte del modelo pedagógico a la hora de enseñar a los adultos mayores acerca de tecnologías, en este caso el teléfono inteligente, siendo sesiones más amenas para ellos y un aprendizaje totalmente progresivo por parte de ellos. Durante el curso se identificaron actitudes participativas sin pena a preguntar acerca de los conceptos teóricos que desconocen, esto permitió generar pensamientos críticos y reflexivos en el proceso de obtención con base al conocimiento.

La corporación universitaria del Huila brinda una formación integra a todas las personas que quieran seguir contribuyendo las capacidades de aprendizaje puesto que se realiza el acercamiento a la población del adulto mayor por parte de la proyección social, cabe recalcar que el proceso investigativo busca en obtener preparación, habilidad e ingenio que trascienda a un plano más allegado a la realidad empresarial y profesión, sino que se difunda a través del semillero Sociedad NTIC, beneficiando a la sociedad de todas las entidades públicas y privadas. Los integrantes que realizan esta proyección social pertenecen a los semestres IX-X de las carreras de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Mecatrónica en su respectivo orden.

REFERENCIAS

- [1] J. Cabero Almenara, J. Ruiz, J. Cabero-Almenara, and J. Ruiz-Palmero, "Las Tecnologías de la Información y Comunicación para la inclusión: reformulando la brecha digital Technologies of Information and Communication for inclusion: reformulating the 'digital gap,'" *Int. J. Educ. Res. Innov.*, vol. 9, pp. 16–30, 2017.
- [2] L. L. Watts Carmen, "Las Tic Como Herramientas De Inclusion." Dic 20, 2017, p. 06, 2017.
- [3] G. de Colombia, "Ley 1276 de 2009 - Ministerio de Salud y Protección Social." Recuperado: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/ley-1276-de-2009.pdf>
- [4] O. A. Vega, P. M. Arroyave-Zambrano, J. Ocampo-Arias, and S. P. Sánchez-Velásquez, "Inclusión digital como opción aportante al envejecimiento activo," *e-Ciencias la Inf.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–136, Jun. 2020.
- [5] "Estadísticas de la situación digital de Colombia en el 2020-2021 | Branch." Recuperado: <https://branch.com.co/marketing-digital/estadisticas-de-la-situacion-digital-de-colombia-en-el-2020-2021/>
- [6] L. J. O. C. Walter Hugo Arboleda Mazo, "Alfabetización digital como herramienta para el envejecimiento activo en el adulto mayor," 2018.
- [7] "Envejecimiento activo: un cambio de paradigma sobre el envejecimiento y la vejez." Recuperado: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6292831>
- [8] "Adultos mayores, formados en competencias digitales." Recuperado: <https://www.alcaldianeiva.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Adultos-mayores,-formados-en-competencias-digitales.aspx>

- [9] OCDE, "Perspectivas de la OCDE en Ciencia, Tecnología e Innovación," 2017.
- [10] M. Flórez Romero, A. J. AGUILAR Barreto, Y. K. HERNÁNDEZ Peña, J. Pablo SALAZAR Torres, J. A. Pinillos, and C. A. Pérez, "Sociedad del conocimiento, las TIC y su influencia en la educación Knowledge society, ICT and its influence on education Contenido," 2017.
- [11] E. de Uso and F. de Educación Y Humanidades Programa De Postgrados, "Una mirada hacia la inclusion del adulto mayor", 2017.
- [12] A. Baz Alonso, I. Ferreira Artime, M. Álvarez Rodríguez, and R. García Baniello EPSIG, "Dispositivos móviles."
- [13] F. Ramos Méndez, Diego; Ortega-Mohedano, "Revista Latina de Comunicación Social," *Rev. Lat. Comun. Soc.*, vol. 1, p. 16, 2017.
- [14] A. J. M. G. G. Eloy López Meneses, José Luis Sarasola Sánchez, "Percepción de los estudiantes de posgrado en gerontología sobre el envejecimiento," 2018. Recuperado: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6882281>
- [15] C. Cardozo, A. E. Martin, and V. Saldaño, "Los adultos mayores y las redes sociales: Analizando experiencias para mejorar la interacción," *Inf. Científicos Técnicos - UNPA*, vol. 9, no. 2, pp. 1–29, Aug. 2017.
- [16] R. Argentina De Gerontología Y Geriatria, "Órgano de la Sociedad Argentina de Gerontología y Geriatria TOMO XXXI-AÑO 30 Repensar el Rol de los Jubilados," 2016.
- [17] I. Aznar Díaz, J. M. Romero Rodríguez, and A. M. Rodríguez García, "La tecnología móvil de Realidad Virtual en educación: una revisión del estado de la literatura científica en España," *EDMETIC*, vol. 7, no. 1, p. 256, Mar. 2018.
- [18] L. A. De *et al.*, "Universidad Cardenal Herrera-CEU," 2015.

Generación semi-automática de un glosario de conceptos para la construcción de una conceptualización unificadora en el dominio de liderazgo

Carlos Mauricio Zuluaga Ramírez¹

Manuela Gómez Suta²

José Soto Mejía³

Julio Cesar Chavarro Porras⁴

Sandra Estrada Mejía⁵

Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

En este capítulo se describe un proceso investigativo encaminado al desarrollo de la primera fase para la construcción de una conceptualización unificadora, con la idea de contrarrestar los problemas presentes en el dominio de liderazgo, relacionados con la falta de parsimonia ocasionada por ambigüedad conceptual, proliferación y superposición de información. Desde su línea teórica, en este trabajo se construyó manualmente un glosario de conceptos que reúne las diversas perspectivas del campo de liderazgo, mediante la clarificación del conocimiento y por medio de la recolección, análisis, procesamiento, unificación y síntesis de la información que se obtuvo a través de literatura especializada. Posteriormente, se estructuró la propuesta de un sistema semi-automático para el aprendizaje ontológico a partir de un corpus etiquetado con los términos y conceptos presentes en el glosario inicialmente construido. Finalmente, ambas estructuras de conocimiento fueron contrastadas para reconocer si el sistema podía extraer constructos desarrollados por humanos. La metodología propuesta siguió lineamientos de las áreas de representación del conocimiento, ingeniería ontológica y el aprendizaje ontológico, que permitieron adoptar una serie de pasos debidamente sustentados para consolidar, ordenar y evaluar adecuadamente los conceptos relacionados con esta área de estudio. Como resultado se obtuvo un glosario de conceptos y una propuesta para el aprendizaje de estructuras ontológicas, tales como términos y conceptos dentro del dominio de liderazgo. Los hallazgos presentados servirán de base para la construcción de la conceptualización unificadora de este campo de estudio, que permita definir sus distintos componentes, aclarar sus términos y restringir su interpretación, disminuyendo así el problema de ambigüedad conceptual y la proliferación y superposición de información.

¹ Ingeniero Industrial, Magíster en Administración del Desarrollo Humano y Organizacional, Doctor(c) en Ingeniería.
Contacto: cmzuluaga@utp.edu.co

² Ingeniera Industrial, Magíster en Investigación Operativa y Estadística.
Contacto: madegomez@utp.edu.co

³ Físico, Magíster en Ciencias Físico Matemáticas, Magíster en Investigación Operativa y Estadística, Doctor en Ingeniería de la Computación.
Contacto: jomejia@utp.edu.co

⁴ Ingeniero de Sistemas, Especialista en Instrumentación física, Doctor en Ingeniería.
Contacto: jchavar@utp.edu.co

⁵ Ingeniera de Sistemas, Especialista en Docencia Universitaria, Magíster en Administración Económica y Financiera, Doctora en Ciencias Pedagógicas.
Contacto: sestrada@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El liderazgo es un área de investigación sobre la que se ha escrito mucho debido a su importancia. Profesionales y revisores de todos los campos de estudio han determinado que constituye una variable central en la ecuación que define el desempeño organizacional [1, 2]. El interés sobre este tema no conoce fronteras geográficas, políticas o temporales [3], ya que el liderazgo es ampliamente reconocido como importante para grupos, organizaciones y sociedades, además se ha consolidado como un factor determinante para los ambientes en los que interactúan personas [4]; por esta razón su estudio ha crecido de forma acelerada y su investigación es cada vez más interdisciplinaria [5].

Según [6-8], la inquietud sobre este tema se remonta hasta el antiguo Egipto y China, pues en estas culturas ya existían términos para identificar este concepto; por ejemplo en el antiguo Egipto se utilizaba la palabra *Seshemet* para referirse a esta idea [9], sin embargo la noción de liderazgo, como se entiende actualmente es relativamente moderna. El Oxford Dictionary explica que la palabra líder aparece en el lenguaje inglés hacia el año 1300 [10], pero la palabra liderazgo no lo hizo sino hasta la primera mitad del siglo XIX en escritos sobre la influencia y control político del Parlamento Británico y solamente comenzó a aparecer en los lenguajes modernos en tiempos recientes [11].

A pesar de ser tan antigua la noción de liderazgo, la historia de la ciencia de su investigación solo comenzó a partir del siglo XX, más precisamente en la época del auge de la gestión, después de la segunda Guerra mundial, desde ese periodo, el liderazgo ha sido constantemente redefinido y por lo tanto ha estado en un incesante estado de descubrimiento y perfeccionamiento [12-22], ocasionando que actualmente existan más de 350 definiciones de liderazgo [23], las cuales a pesar de su número, no han parecido suficientes para explicar de una manera concisa y compartida este concepto, sin embargo [24] brinda una definición que podría ser una buena síntesis de la mayoría de explicaciones actuales. Estos autores definen al liderazgo *como el proceso en el cual influyen líderes sobre seguidores y viceversa, para lograr los objetivos de una organización a través del cambio.*

Durante estos años de investigación científica, el análisis del campo del liderazgo se ha dividido en líneas de investigación o enfoques, que han tenido asociadas teorías, modelos, estilos y variables que lo han explicado desde perspectivas diferentes y en ocasiones desde aspectos escasos, ignorando elementos importantes para su comprensión global; esto ha generado gran cantidad de interpretaciones sobre el tema, lo que ha obstaculizado la comunicación entre investigadores y ha producido ambigüedad, conclusiones imprecisas e inconvenientes para articular teorías y modelos. Las dificultades teóricas en este dominio, no son nuevas, ya que se han venido observando desde 1977 cuando [2] encontró que ciertos constructos de este campo sufrían ambigüedades conceptuales. Más adelante [25], mediante una extensa revisión, esbozaron una gran cantidad de clasificaciones de comportamientos de liderazgo. Posteriormente en 2002, [26] observó que la proliferación de las teorías de liderazgo era desconcertante.

Por otro lado, [27] reportó evidencia de superposición conceptual entre los constructos de liderazgo prevalecientes, declarando que las nuevas teorías del comportamiento del líder continuaban siendo concebidas sin una comparación explícita con las ya existentes. Esta falta de comparación y análisis también se pudo observar en otras teorías de liderazgo, que fueron creadas para ser conceptual y funcionalmente distintas, pero que finalmente presentaron problemas de superposición significativa y similitudes [28-33].

Todos estos inconvenientes relacionados con la proliferación, superposición y ambigüedad de información dentro del campo de liderazgo, han sido en parte consecuencia de limitaciones teóricas y metodológicas que han permitido la generación de términos, conceptos y relaciones similares desde distintos puntos de vista, lo cual ha agregado complejidad innecesaria a la comprensión de este tema [34, 35] y ha ocasionado que el tamaño de la literatura del liderazgo se haya expandido rápidamente en este ámbito académico [36-39], siguiendo un enfoque de amplitud en lugar de profundidad.

Esto ha mostrado un problema de falta de parsimonia [91] en el campo de liderazgo, el cual se ha convertido en un asunto serio, porque una disciplina que busca explicaciones excesivas y complejas ignorando el mandato de la parsimonia, no puede avanzar en su base teórica y lograr conocimiento acumulativo.

La ausencia de un enfoque parsimonioso que busque simplicidad, rigor, transparencia y precisión en la producción teórica del dominio de liderazgo, dificulta la concepción de una conceptualización unificadora, adecuadamente construida, concisa y sin ambigüedades y por ende, continúan surgiendo interpretaciones desde distintos enfoques, generando teorías, modelos, estilos y variables que explican al liderazgo desde perspectivas distintas o aisladas, acentuando las dificultades en la comunicación entre investigadores, profundizando la ambigüedad, produciendo conclusiones imprecisas y obstáculos para articular los distintos constructos propios de esta área de estudio.

Lo anterior ha generado un ciclo reforzante (Figura 1) que impide la acumulación y crecimiento teórico profundo del campo del liderazgo, pues no se tiene una visión unificadora porque no se atacan adecuadamente los generadores de la falta de parsimonia dentro de este dominio, como son la proliferación, superposición y ambigüedad de información y estos inconvenientes no pueden abordarse sin la existencia de una conceptualización unificadora formalmente constituida, que brinde elementos claros para la formación, ordenamiento e integración de los distintos enfoques, teorías y modelos que hacen parte de esta área de estudio.

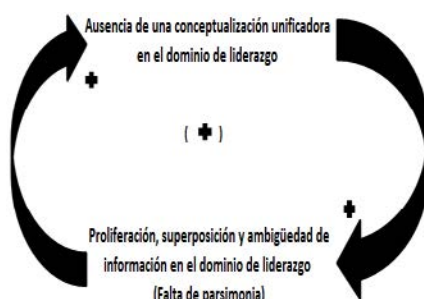


Figura 1. Ciclo reforzante para el dominio de liderazgo

Siendo conscientes de toda esta problemática, diversos teóricos han desarrollado algunos esfuerzos de unificación, con el fin de sintetizar las diversas perspectivas relacionadas con el liderazgo, sin embargo estos han presentado una serie de inconvenientes, por ejemplo algunos marcos conceptuales integradores se han quedado incompletos, han estudiado el liderazgo desde perspectivas poco abarcadoras, se han basado solamente en la comprensión de los investigadores o no han incluido ciertos aspectos importantes [3], [30], [40]. Por su parte, ciertas taxonomías⁶ desarrolladas han presentado falta de generalidad e inconsistencias en el desarrollo y utilización de conceptos principales y categorías [25, 26, 31, 41].

Adicionalmente algunas ontologías⁷ desarrolladas son demasiado estrechas, plantean problemas de causalidad, no tienen intensiones generalizadoras, utilizan perspectivas netamente filosóficas, están conformadas por metacategorías superiores que generan imprecisiones y ambigüedades o no logran abarcar la gran mayoría de enfoques, teorías, modelos y estilos que hacen parte del campo estudiado [42-47]. De otro modo la mayoría de meta-análisis⁸ desarrollados, exploran solamente los constructos de liderazgo más investigados, plantean problemas de endogeneidad⁹ o presentan incapacidad al momento de definir causalidades [38, 48, 49].

Todos esos trabajos, permitieron advertir que aún es vigente el pensamiento de [50] cuando afirmó que las décadas de investigación sobre el tema de liderazgo han producido solamente un conjunto de hallazgos desconcertantes y una acumulación interminable de datos empíricos que no han generado una

⁶ Término que engloba tanto el proceso de adscribir entidades a clases como el de ordenar las clases según su grado de abstracción. El resultado del proceso taxonómico se puede representar gráficamente en forma de árbol o cierto tipo de grafo que según sea recorrido da lugar a mecanismos de modelado [92]. Una taxonomía también se puede considerar como una ontología ligera, porque brinda un consenso y una conceptualización de un dominio dado con pocas expresiones lógicas.

⁷ Especificación formal y explícita de una conceptualización compartida [93].

⁸ Revisión sistemática en la que se aplican técnicas estadísticas para el análisis cuantitativo de los resultados de un conjunto de estudios sobre un tema común [94].

⁹ Concepto estadístico que se refiere a que la relación entre una variable explicativa X y otra que se quiere explicar Y viene determinada por otras variables que no se han tenido en cuenta E y que covarían con X. De este modo, $cov(X,E) \neq 0$ [95].

comprensión integrada del liderazgo. Esto ha ocasionado el surgimiento de la variedad de estudios que han creado una maraña de conceptualizaciones abstractas, expresadas en términos vagos y una gran cantidad de trabajos desarticulados que tratan el tema, ocasionando que una perspectiva sencilla, concisa y unificadora para este campo siga permaneciendo inalcanzable, ya que como se ha observado, cada investigador suele estudiarlo de acuerdo con su perspectiva individual, el aspecto del fenómeno de mayor interés para él y sus preferencias metodológicas.

Esta complejidad en el dominio de liderazgo, hace necesario realizar abordajes más amplios, integrados e integrales que permitan comprender los distintos elementos comunes a sus diversas perspectivas, para así desarrollar una conceptualización unificadora, sencilla, compartida, concisa e integrada que posibilite profundizar en la base teórica del liderazgo y lograr conocimiento acumulativo, ayudando a eliminar los generadores de la falta de parsimonia.

Secundando el pensamiento de [51] para consolidar adecuadamente una concepción unificadora del campo de liderazgo que permita atacar los problemas de ambigüedad, superposición y proliferación de constructos, es necesario comenzar por aclarar qué teorías son subconjuntos entre sí o equivalentes entre sí, cómo se relacionan estas teorías con diversos modelos y profundizar en la comprensión de similitudes y diferencias de estilos de liderazgo. Además, es importante construir una mejor clasificación taxonómica y una explicación clara de los conceptos subyacentes a este campo, para determinar cuáles de ellos están contenidos en cada teoría y qué interacciones poseen.

Todo lo anterior permite advertir que para afrontar el problema presente en el campo de liderazgo es necesario un trabajo riguroso que aplique metodologías y métodos adecuados con el fin de construir una conceptualización unificadora subyacente a este dominio, la cual sirva para reducir la proliferación de terminología, la ambigüedad en las definiciones, la superposición de información y la poca claridad en cuanto a conceptos constituyentes de las teorías de liderazgo y sus relaciones.

Es por ello que en este documento, se presenta la primera fase del proceso investigativo que busca atacar los problemas anteriormente descritos, ordenando inicialmente el conocimiento teórico del campo de liderazgo por medio de un glosario de conceptos, llevado a cabo mediante un proceso de desarrollo metodológico que siguió lineamientos de áreas como la Representación de Conocimiento¹⁰, la Ingeniería Ontológica¹¹ y el Aprendizaje Ontológico¹², los cuales permitieron adoptar una serie de pasos debidamente sustentados para generar una propuesta de un sistema semi-automático para el aprendizaje ontológico, a partir de un corpus etiquetado con los términos y conceptos del glosario de constructos desarrollado.

Para construir una conceptualización referente a la unificación de un dominio particular como en el caso del liderazgo, es necesario inicialmente identificar los conceptos relevantes, subyacentes y comunes a los diversos enfoques, teorías, modelos y estilos que lo conforman; para ello es importante recolectar, extraer, analizar, comparar e integrar la información disponible en la literatura referente al tema y generar a partir de ella una abstracción que capture, especifique y documente el conocimiento consensuado del dominio.

Los conceptos son ideas abstractas que se formulan de un dominio o fenómeno [52], surgen de la agrupación de términos relacionados y usualmente, poseen una etiqueta que representa el conglomerado. En específico, el sentido de un concepto brota del contexto formado por sus correspondientes unidades léxicas¹³.

¹⁰ Área de la inteligencia artificial cuyo objetivo fundamental es expresar información acerca del mundo y razonar con ella [96].

¹¹ Rama de la ingeniería y ciencias de la computación e información que abarca todas las actividades concernientes al proceso de desarrollo de las ontologías, a su ciclo de vida, los métodos, metodologías para construir esquemas conceptuales, las herramientas y lenguajes que los soportan [97, 59].

¹² Área de conocimiento que incluye la extracción de términos de un dominio y las relaciones entre los conceptos que estos términos representan de un corpus de texto en lenguaje natural, además de su codificación con un lenguaje de ontologías para una fácil recuperación.

¹³ Unidad de significado en el lexicón mental, la cual sirve como elemento vehiculador de la cultura y puede estar formada por una palabra, simple o compuesta (coche, agridulce, camposanto ...) o por varias, denominada unidad léxica pluriverbal (buenos días, encantado de conocerte, llover torrencialmente, odio mortal, hora punta, pedir la mano, por la boca muere el pez ...) [98].

Los términos son los bloques básicos para construir cualquier estructura de conocimiento ya que son las unidades léxicas que explícitamente aparecen en corpus o documentos, por ende, son las representaciones textuales de los conceptos. Un término puede estar formado por un sólo token (i.e. follower) o múltiples tokens (i.e. vertical dyad linkage theory).

Existen sistemas de aprendizaje ontológico que emplean estrategias de campos como el procesamiento de lenguaje natural¹⁴ para recuperar información, extrayendo términos con los cuales se construyen conceptos que pueden ser esquematizados a través de una estructura conceptual [53]. Este proceso permite construir cualquier estructura de conocimiento usando como entrada un conjunto de textos relacionados con el dominio de estudio, dicha estructura puede ser también validada en términos de sus características léxicas y conceptuales o cualidades de esquematización resultantes [54].

La extracción de términos y conceptos puede ser refinada a través de técnicas estadísticas provenientes de los sistemas de recuperación [55]. Estas técnicas consideran la información semántica de corpus o documentos y han sido ampliamente utilizadas para extraer términos, conceptos y relaciones taxonómicas.

Una técnica común es la ponderación estadística, la cual establece unidades léxicas relevantes al considerar la frecuencia con que estas aparecen dentro de un corpus. Las métricas más utilizadas para este análisis son TF-IDF¹⁵ y TF-entropía. Así mismo, las medidas como C/NC-value son usadas para extraer colocaciones¹⁶ porque tienen en cuenta la anidación de un término candidato en otros, es decir, calculan un puntaje para cada término a partir de la información sintáctica de otras unidades léxicas [56].

Las técnicas de *Topic modeling* son usualmente empleadas para la formación de conceptos a través del agrupamiento que permite establecer estructuras de conocimiento a partir de la detección de candidatos conceptuales y el filtrado de conceptos similares [56].

Al construir estructuras de conocimiento a partir de textos, es importante validar si estas modelan correcta y eficientemente el dominio específico, para ello se utilizan técnicas asociadas a la evaluación basada en *Gold Standard* que contrasta los conceptos extraídos contra una referencia ideal de lo que debería ser la estructura de conocimiento [54].

La evaluación a partir de *Gold estándar* consiste en validar la congruencia entre las estructuras aprendidas contra una referencia considerada correcta, la cual es usualmente construida por humanos. Esta técnica utiliza las medidas de comparación llamadas (*precision*¹⁷ y *recall*¹⁸) de los sistemas de recuperación de información [40].

En esta propuesta de sistemasemi-automático para el aprendizaje ontológico se utilizó inicialmente un enfoque manual, que permitió generar una estructura de conocimiento propia del dominio de liderazgo mediante un análisis de especialistas que agruparon términos para generar constructos; posteriormente, se etiquetó un corpus relacionado con el dominio para extraer términos que permitieran describir constructos del campo de estudio a través de técnicas lingüísticas y estadísticas. Finalmente, se extrajeron términos y conceptos de forma automática empleando técnicas estadísticas y de topic modeling, las cuales fueron validadas contra un *gold standard* (glosario de conceptos y etiquetado de términos).

¹⁴ Campo de las ciencias de la computación, de la inteligencia artificial y de la lingüística que estudia las interacciones entre las computadoras y el lenguaje humano [99].

¹⁵ frecuencia de término – frecuencia inversa de documento, es una medida numérica que expresa cuán relevante es una palabra para un documento en una colección. Esta medida se utiliza a menudo como un factor de ponderación en la recuperación de información y la minería de texto.

¹⁶ Designan combinaciones frecuentes de unidades léxicas fijadas en la norma o una combinación de palabras que se distingue por su alta frecuencia de uso, como por ejemplo: cierre hermético, maraña inextricable, desear ardientemente, negar categóricamente, etcétera.

¹⁷ Es una métrica empleada en la medida del rendimiento de los sistemas de búsqueda y recuperación de información y reconocimiento de patrones. La precisión es el ratio entre el número de documentos relevantes recuperados entre el número de documentos recuperados.

¹⁸ Es una métrica empleada en la medida de la fracción de instancias relevantes que han sido recuperadas.

2. MÉTODO

Se presenta el proceso que debió desarrollarse para la construcción del glosario de conceptos relacionados con el dominio de liderazgo, este fue ajustado con base en los procedimientos sugeridos en [57-62], tal como se muestra a continuación.

2.1 Definición de un glosario de conceptos

Inicialmente fue necesario desarrollar un proceso de adquisición de conocimiento mediante una revisión bibliográfica de modelos, taxonomías, ontologías y literatura existente relacionada con el dominio de liderazgo, este paso se llevó a cabo para capturar y especificar conocimiento común disponible en este campo, con el fin de descubrir términos relevantes que serían la base para la descripción de la abstracción a desarrollar.

Para lo anterior se llevó a cabo un proceso de revisión sistemática de literatura consultando cinco bases de datos especializadas afines al tema de esta investigación como fueron Scopus, IEEEExplore Digital Library, Science Direct, Web of Science y ACM Digital Library; en ellas se introdujeron ecuaciones de búsqueda construidas con palabras claves propias del tema de interés como fueron: liderazgo, líder, taxonomía, caracterización, ontología, teorías de liderazgo, enfoques de liderazgo, modelos de liderazgo, estilos de liderazgo, resultado organizacional, variables organizacionales, metamodelo¹⁹, modelo de unificación y modelos sustitutos.

Estas ecuaciones de búsqueda permitieron identificar documentos relacionados con la combinación de términos claves derivados del objetivo de la investigación y a su vez generar sub-búsquedas con el fin de profundizar en el tema de interés. Los documentos obtenidos fueron depurados validando cuáles de ellos realmente contaban con abstract y palabras claves acordes al tema de estudio, además se incluyeron criterios de inclusión, exclusión y estrategias de evaluación de calidad y síntesis de datos para facilitar el resumen y análisis de la información relacionada con el estado actual del conocimiento en este tema.

Los criterios de inclusión permitieron tener en el estudio documentos tipo libros, tesis, artículos de investigación, revisión, capítulos de libros y documentos de conferencias; además se incluyeron escritos de áreas afines al objetivo de la investigación como fueron ingeniería; negocios, administración y contabilidad, ciencias sociales y psicología. Por su parte, se excluyeron de la investigación aquellos escritos que a pesar de contener los términos de búsqueda o combinaciones de ellos tanto en el abstract como en sus palabras clave no aportaban información relevante para el estudio, además se descartaron prólogos de libros o reseñas y artículos donde el área de interés estaba relacionada con las ciencias de la salud, ciencias de la vida y ciencias políticas.

Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión al grupo de documentos seleccionados, se procedió a realizar una evaluación de calidad que consistió en someter estos escritos escogidos a un análisis más riguroso enfocado en la estructura de *contribuciones*, es decir, se observó detalladamente el contenido del resumen, la introducción y las conclusiones de cada escrito y se seleccionaron solamente aquellos que brindaban información relevante e importante para la investigación.

Mediante la ejecución del anterior protocolo de revisión sistemática, fueron elegidos 440 documentos que se sometieron a un proceso de análisis detallado, mediante el cual se obtuvo la información utilizada para establecer qué elementos de las diversas perspectivas de liderazgo eran subconjuntos entre sí, equivalentes o distintos entre sí, cómo se relacionaban las diversas teorías con los distintos modelos y profundizar en la comprensión de similitudes, diferencias y superposiciones de información en este dominio. Lo anterior, permitió generar una lista ordenada y concisa de términos comunes, subyacentes a este campo y definir las interacciones que poseían. Posteriormente, los términos similares obtenidos en esta etapa se agruparon en

¹⁹ Modelo que pretende ofrecer una imagen global de un proceso, sistema, etc, especialmente mediante la abstracción de modelos individuales más detallados contenidos en él [100]. Es un modelo de un modelo, que es descrito usando un lenguaje de modelado y representa conceptos del sistema a desarrollar. El metamodelo describe las reglas del lenguaje de modelado en sí mismo [96].

clases o categorías con características comunes mediante el enfoque de agrupación conocido como Middle-out²⁰ [63].

Todo lo anterior permitió la construcción de categorías o constructos generales y unificados para el dominio de liderazgo y la asignación de sus significados.

En la Tabla 1 se presenta un ejemplo del glosario de conceptos que incluyó los términos relevantes para el dominio de liderazgo, sus nombres, descripciones en lenguaje natural y sinónimos si es el caso. El glosario completo consta de 72 constructos.

Tabla 1. Ejemplo glosario de conceptos para la conceptualización unificadora del dominio del liderazgo.

Constructo	Sinónimo	Descripción
Hersey and blanchard's situational leadership model	<ul style="list-style-type: none"> • Hersey and Blanchard's model. • situational leadership model • Situational leadership model of Paul hersey y Ken Blanchard 	Focused on the characteristics of the followers as an important element of the situation and as a consequence of determining the effective behavior of the leader [64-66].
Vertical dyad Linkage Theory	<ul style="list-style-type: none"> • Leader-member exchange theory • LMX • LMX Theory 	The leader's behavior depends on the relationship with the follower and varies between followers; this relationship is affected by situational variables such as frequency of communication, characteristics of the follower, satisfaction and work environment [66].
Achievement goal theory	<ul style="list-style-type: none"> • Path goal theory • Path goal theory of leadership 	Leaders motivate their followers by showing them behaviors that can be helpful in achieving goals [67].
charismatic leadership theory		Characteristics, personal behaviors and results lead followers to attribute to a leader a charismatic quality that gives him/her influence and power in certain situations [30, 65].
Situational Contingency Theory	<ul style="list-style-type: none"> • Situational theory • Contextual Theory • Contingency theory 	A leader is effective when there is an appropriate fit between his/her behavior and situational conditions [65, 66, 68].
Transformational leadership theory	<ul style="list-style-type: none"> • Transformational theory 	Leadership is a reciprocal influencing process in which leaders and followers transform their behaviors by elevating each other to ever-increasing heights of morality and motivation. the leader through charisma encourages and inspires followers to find purpose beyond individual needs as they seek transformation and collective change of the organization through interaction and learning with others [3, 11, 43, 65, 69-71].

El anterior glosario de conceptos se utilizó en la segunda etapa metodológica como una entrada para la construcción y validación semiautomática de estructuras ontológicas como conceptos y términos. Otra entrada del proceso fue un corpus de trabajo construido siguiendo los mismos criterios señalados. Este corpus fue etiquetado manualmente por dos asistentes de investigación bajo el asesoramiento de algunos autores de este trabajo. El etiquetado consistió en identificar términos dentro del corpus que permitieran describir constructos de liderazgo contenidos en el glosario conceptual. De esta forma, los etiquetadores establecieron terminología para cada uno de los conceptos dentro del glosario.

2.2 Propuesta metodológica para la extracción automática de estructuras ontológicas en el dominio de liderazgo

Esta propuesta metodológica tuvo cuatro fases. La primera abordó el pre-procesamiento del corpus; en la segunda se valoró el etiquetado manual del corpus; mientras que la tercera conllevó la formación de vocabulario; en la cuarta se construyó conceptos y relaciones que finalmente se evaluaron. La Figura 2 resume la propuesta metodológica.

²⁰ Enfoque de agrupación que es el resultado de una mezcla de los enfoques *top-down* y *bottom-up*, comienza identificando un núcleo de categorías base que deben ir especificándose y generalizándose según sea necesario.

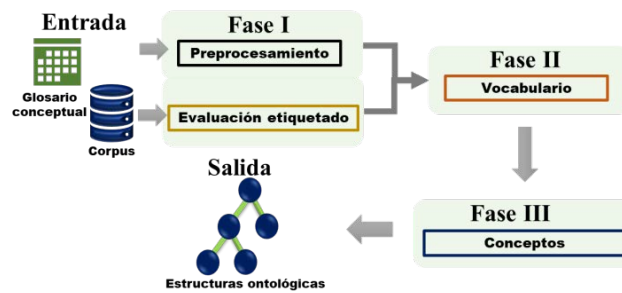


Figura 2. Propuesta metodológica para la extracción automática de estructuras ontológicas en el dominio de liderazgo

2.2.1 Fase I: Preprocesamiento y evaluación etiquetado

En la fase de preprocesamiento se normalizaron los caracteres dentro de los textos. En particular, este estudio ejecutó las siguientes tareas. La primera fue reconocer las siglas presentes en los documentos mediante expresiones regulares e identificación manual de las correspondientes expresiones complejas. De esta forma, la investigación reemplazó siglas como *SLT* por su correspondiente expresión *Situational Leadership Theory*.

Después, el texto sufrió el proceso de lematización²¹ y normalización a minúscula. Los términos denotados como sinónimos dentro del glosario conceptual fueron estandarizados por su correspondiente constructo. La siguiente tarea conllevó a eliminar *stopwords*²², signos de puntuación, caracteres numéricos y filtrados siguiendo el etiquetado POS²³. Por último, esta investigación ejecutó un análisis de colocaciones para establecer expresiones compuestas como *leadership management behavior*.

En el análisis de colocaciones se plantearon dos estrategias. Primera, utilizar el glosario conceptual para aprender las colocaciones allí presentes. Segunda, examinar el corpus con el fin de reconocer las colocaciones formadas hasta por tres tokens cuya etiqueta POS fuera sustantivo o adjetivo, además, se valoró la asociación entre los tokens mediante la métrica PPMI (*Positive Pointwise Mutual Information*) [72]. Esta medida parte de *Pointwise Mutual Information* (PMI) que permite reconocer la asociación entre palabras al comparar la probabilidad con qué se observan los dos tokens y lo que se esperaría si se dieran independientemente. Específicamente, PMI es cero cuando dos términos son independientes entre sí, por el contrario, entre mayor sea este valor se entiende que los términos pueden constituir una colocación. El valor negativo de PMI no es fiable a menos que el corpus sea enorme [73]. Por lo anterior, la métrica PPMI es apropiada ya que no considera los valores negativos de PMI y en su lugar interpretan como cero estos datos.

Durante la evaluación de etiquetado se evaluó la fiabilidad inter observador de los 106 constructos etiquetados manualmente. En este orden, el índice Kappa²⁴ (κ) permitió reconocer las estructuras donde los etiquetadores tuvieron como mínimo un acuerdo moderado siguiendo la escala propuesta en [74]. De esta forma, fue posible reconocer los constructos del liderazgo donde los revisores no presentaron concordancia. Estos constructos fueron eliminados, así se obtuvo el listado de referencia que facilitó la evaluación del vocabulario y conceptos.

2.2.2 Fase II: Vocabulario

Es usual implementar esquemas de ponderación para asociar a cada término un peso que permita representar su relevancia dentro del corpus, de esta forma, construir un vocabulario de términos relevantes para describir el contenido de los textos [75]. Este trabajo experimentó con cinco esquemas de ponderación:

²¹ Proceso lingüístico que consiste en, dada una forma flexionada, hallar el lema correspondiente. El lema es la forma que por convenio se acepta como representante de todas las formas flexionadas de una misma palabra.

²² Nombre que reciben las palabras sin significado como artículos, pronombres, preposiciones, etc. que son filtradas antes o después del procesamiento de datos en lenguaje natural.

²³ Es el proceso de asignar (o etiquetar) a cada una de las palabras de un texto su categoría gramatical.

²⁴ Representa la proporción de acuerdos observados más allá del azar respecto del máximo acuerdo posible más allá del azar.

1. *Inverse Document Frequency* IDF: Cuantifica la proporción inversa de ese término en el corpus.
2. *Entropía*: Expresa el número de veces que el término aparece en cada texto analizado y el corpus. Para evitar indeterminaciones matemáticas cuando un término no aparece en un documento, se aproxima a cero el logaritmo de la frecuencia del término en el texto y el corpus.
3. *Estudio de [76]*: Este estudio calcula *term frequency* TF para todos los términos y diferencia el esquema global de ponderación. Por un lado, la métrica IDF para unigramas, y para las colocaciones, se considera una medición de los esquemas NC-value y C-Value. NC-Value identifica los adjetivos, verbos y sustantivos que conforman la vecindad de un término candidato para calcular un factor de ponderación que asigna un valor alto a colocaciones rodeadas por palabras con las categorías de interés. La ponderación C-Value está en la ecuación (1), donde t es el término candidato, $|t|$ es la longitud del término candidato, $f(t)$ es la frecuencia del término candidato en el corpus, T_t es el conjunto de términos que contienen a t (*i.e.* conjunto de palabras que poseen como sub-término a t), $P(T_t)$ es la frecuencia en el corpus de la palabra más larga conformada por el término candidato y $\sum_{b \in T_t} f(b_t)$ es la frecuencia de aparición del término candidato como sub-término de cualquier palabra b que pertenece a T_t . C-Value asigna un valor alto a los términos que aparecen frecuentemente en el corpus y escasamente dentro de otros términos.

$$C - Value_t = \begin{cases} \log_2 |t| f(t) & \text{si } T_t \in \emptyset \\ \log_2 |t| f(t) - \frac{1}{P(T_t)} \sum_{b \in T_t} f(b_t) & \text{si } T_t \notin \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

4. *Primera modificación al estudio de [76]*: Este estudio plantea sólo considerar las ponderaciones globales, es decir no cuantificar el valor TF. Así mismo, se propone no cuantificar NC-Value ya que en el procesamiento se filtraron términos siguiendo el etiquetado POS.
5. *Segunda modificación al estudio de [76]*: Esta modificación es similar a la presentada en [77] donde la métrica IDF es reemplazada por entropía. Además, esta segunda propuesta mantiene los cambios de la ponderación anterior.

Para seleccionar el vocabulario, este trabajo utilizó la evaluación basada en *Gold standard* dado que los resultados son reproducibles y comparables al examinar el mismo corpus [78]. Específicamente, el *Gold standard* fue el listado de términos identificados por humanos y valorado en la fase I, de esta forma, la referencia estuvo formada por palabras asociadas a constructos donde los etiquetadores tuvieron como mínimo un acuerdo moderado. La evaluación basada en *Gold standard* permitió cuantificar índices como *precisión, recall* y *f-measure*²⁵ donde las estructuras de conocimiento aprendidas son valoradas en función de la correcta clasificación de las unidades terminológicas.

2.2.3 Fase III: Conceptos

Los conceptos, como ya fue descrito son ideas abstractas que representan un dominio o fenómeno [52] y surgen de agrupar términos relacionados, por esta razón, el sentido de una estructura conceptual germina del contexto formado por sus correspondientes unidades léxicas [79]. En este orden, este trabajo construyó conceptos mediante el modelo *Latent Dirichlet Allocation (LDA)* [80] pues considera los efectos contextuales al generar anotaciones de dominio. En particular, LDA extrae de forma no supervisada temáticas (*i.e.* conjuntos de términos o conceptos) para describir el contenido del corpus, de tal forma que una temática es modelada como una distribución de probabilidad sobre el vocabulario y un documento es representado como una distribución de probabilidad sobre un conjunto de temas [81]. Intuitivamente, cada término capturado en una temática aporta al contexto que describe el significado del concepto [79].

En este sentido, LDA es un modelo apropiado para adquirir conocimiento del corpus y establecer conceptos que permitan el aprendizaje de ontologías resistente a la obsolescencia, la rentabilidad y el crecimiento vertiginoso de la información [82]. No obstante, trabajos semejantes [77], [83] señalan que LDA construye conceptos no diferenciables entre sí. Por lo anterior, esta investigación empleó una estrategia de filtrado

²⁵ Es la medida de precisión que tiene un test. Se emplea en la determinación de un valor único ponderado de la precisión y la exhaustividad. Se suele emplear en la fase de pruebas de algoritmos de búsqueda y recuperación de información y clasificación de documentos.

para seleccionar temáticas que describen el contenido del corpus sin llegar a presentar datos redundantes. El filtrado de contenido es usual en la tarea de resumen extractivo automático de documentos donde se establecen oraciones que ejemplifican conceptos del corpus, de tal forma que las sentencias deben exponer las diversas temáticas sin formular temas repetitivos [84]. En particular, el abordaje no supervisado de esta tarea aplica la divergencia Jensen-Shannon DJS para valorar la entropía de la información entre dos comunicaciones (como lo son conceptos), de esta forma, descartar oraciones que brinden información semejante [85]. Esta investigación usó DJS para filtrar conceptos y obtener temáticas diferenciables entre sí. A continuación, se describe la estrategia de filtrado:

1. Se calcula *Topic Coherence* TC [81] para cada tema construido por el modelo LDA. Esta métrica indica la interpretabilidad semántica de cada concepto modelado. La ecuación (2) expone la propuesta de [86] donde se evalúa la coherencia de cada tema a partir de la coocurrencia documental de los términos relevantes dentro de la temática.

$$TC(t; V^{(t)}) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{m=2}^N \sum_{l=1}^{m-1} \log \frac{f(v_m^{(t)}, v_l^{(t)})+1}{f(v_l^{(t)})} \quad (2)$$

Donde $V^{(t)} = (v_1^{(t)}, \dots, v_N^{(t)})$ es la lista de los N top términos dentro del concepto (o tópic) t, es decir, los términos más probables dentro de la temática. $f(v)$ es la frecuencia del término v en el corpus, y $f(v, v')$ es el número de textos que contienen simultáneamente a v, v' . Así, un concepto interpretable es aquel cuyas palabras más probables llegan a presentarse en los mismos textos, en consecuencia, TC brinda valores negativos cuando el tema tiende a no ser interpretable semánticamente. Para ejecutar este paso, se tomaron los 30 top términos dentro de cada tema.

2. Se organizan las temáticas de forma descendente considerando el valor de TC.
3. El concepto más coherente ingresa al conjunto de conceptos no redundantes que describen el corpus.
4. Se evalúa la DJS para ingresar los subsecuentes conceptos. Así, se valora la DJS entre la temática candidata y aquellas que hacen parte del conjunto de conceptos no redundantes. Si la distancia DJS, entre la temática candidata y cada concepto previamente seleccionado, es mayor a un umbral (φ) entonces la temática candidata es seleccionada, en caso contrario, es descartada. Este paso se repite hasta valorar todos los temas construidos mediante el modelo LDA. El umbral φ se estableció como el primer cuartil de los valores de la matriz triangular superior de distancia DJS entre los conceptos candidatos.

LDA tiene tres hiperparámetros: eta (η) que es la probabilidad a priori de los términos, alpha (α) señalando la probabilidad previa de cada temática y el número de temas que el modelo debe hallar. Esta investigación calibró estos parámetros buscando que las temáticas fueran interpretables semánticamente y no redundantes. En este sentido, se utilizó una combinación entre TC de los temas resultantes mediante la estrategia de filtrado y el porcentaje de temáticas filtradas (*%filtrados*). La ecuación (3) presenta el esquema empleado para la calibración del modelo.

$$Calibración = \frac{|TC| + \%filtrados}{2} \quad (3)$$

Así, TC es llevado al rango $[0, inf)$ siendo cero el valor asociado a un modelo que produzca conceptos con la mejor coherencia posible. Además, la redundancia se valora como el porcentaje de temas descartados, por ende, valores cercanos a cero indican que el modelo extrae conceptos representativos del corpus. En este sentido, la ecuación 3 toma valores cercanos a cero cuando los conceptos generados son coherentes y no redundantes.

La evaluación basada en *Gold standard* permitió valorar las temáticas construidas, de esta forma, establecer los conceptos más semejantes a los presentes en el glosario generado manualmente. Es importante señalar que esta evaluación se efectuó en los temas que describían contenidos de documentos previamente no vistos, considerando los 60 términos más probables dentro de cada tema. Por ende, se reconocieron los conceptos con mayor probabilidad en los documentos de evaluación, después estas temáticas fueron valoradas contra el referente manual.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El glosario conceptual del liderazgo contiene 72 constructos del dominio redactados en inglés. Además, el corpus etiquetado consistió en 171 documentos escritos en el idioma inglés, con 62.586 sentencias y 1.415.037 tokens antes de preprocesamiento. Esta sección está organizada de la misma forma que el apartado 2.2. Los esquemas y enfoques descritos fueron implementados en Python 3.7. Los experimentos fueron ejecutados en una máquina con procesador AMD Ryzen 5 @ 2.2 GHz/4 core y memoria de 8 GB.

3.1 Fase I: Preprocesamiento y evaluación etiquetado

El análisis de siglas permitió reconocer 251 abreviaciones y sus respectivas expresiones complejas. Así mismo, este estudio utilizó los paquetes de lematización y tokenización dentro de la librería stanza 0.1.0. El listado de *stopwords* fue una compilación entre el conjunto en inglés publicado por *Google code Project*. Mediante el análisis de colocaciones permitió crear un listado de 32136 ngramas cuyo tamaño varió entre ocho a dos tokens, considerando las estrategias expuestas en la sección anterior.

La Figura 3 presentan la distribución de las 106 estructuras siguiendo el resultado del índice Kappa, de esta forma, se afirma que los etiquetadores tuvieron un acuerdo sustancial o mayor en el 83.96% de los conceptos etiquetados. Además, nueve conceptos presentaron un acuerdo casual y dos estuvieron en la categoría acuerdo razonable, indicando que en estas etiquetas no existía una concordancia adecuada entre los revisores, por ende, estas etiquetas no fueron consideradas durante la evaluación de la fase II y III.

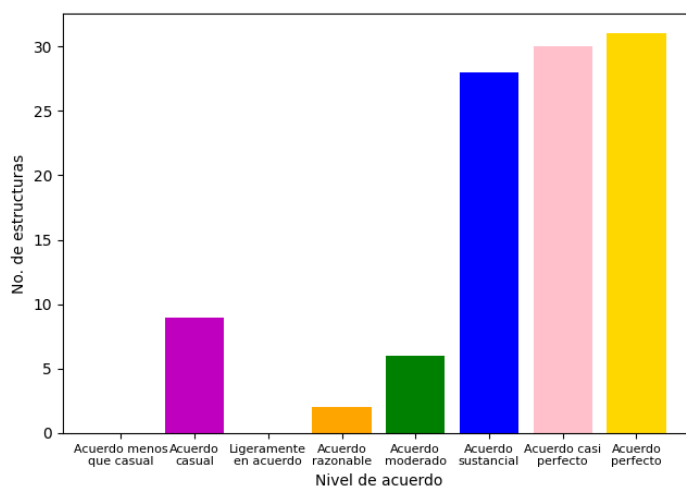


Figura 3. Distribución de las 106 estructuras siguiendo los resultados del índice Kappa

A continuación, se presenta el listado de los conceptos donde los etiquetadores presentaron un acuerdo casual y acuerdo razonable: *social exchange theory, creative leadership, approach, adaptive leadership theory, task relation behavior, transactional leadership theory, task relationship oriented, consideration structure, target model, cognitive leadership theory, theory z*.

3.2 Fase II: Vocabulario

Mediante el preprocesamiento efectuado se obtuvo un listado de 8272 términos considerando unigramas y colocaciones. El método de filtrado reportado en [87] y utilizado en [77] permitió seleccionar el vocabulario. Es así como:

1. Se organizaron ascendentemente los listados de términos adquiridos mediante los esquemas de ponderación.
2. Se descartó el término que dado el esquema de ponderación era el menos relevante.
3. Se calculó la *f-measure* para el nuevo listado.
4. Se repitió el segundo y tercer paso hasta que no quedaron términos para representar el corpus.
5. Se compararon los resultados de la *f-measure* para todas las iteraciones y esquemas de ponderación, de esta forma seleccionar el listado de términos más similar contra el *Gold standard*.

En la Tabla 2 se presenta las características para los listados con mejores valores *f-measure*, las dos últimas columnas muestran el número de colocaciones y unigramas recuperados que aparecen en el *Gold standard*. Sumado a esto, el listado de referencia contiene 2858 términos de los cuales 2600 son colocaciones.

Tabla 2. Listados de términos valorados con Gold standard

Esquema	Términos	<i>F-measure</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	Colocaciones relevantes	Unigramas relevantes
IDF	4619	67,032	87,684	54,254	2263	243
Entropía	4557	60,148	78,027	48,936	2010	220
[76]	8271	51,361	100,0	34,554	2600	258
Primera modificación [76]	3677	75,017	75,017	58,308	2131	13
Segunda modificación [76]	3683	72,568	72,568	56,313	2059	15

El esquema del estudio de [76] presenta el menor valor de *f-measure* ya que el 65.45% de los términos seleccionados no hacen parte de la referencia, por ende, el nivel de *recall* es perfecto pero la *precision* es la menor reportada en la Tabla 2. Este resultado es evidencia de que las medidas locales no son apropiadas para reconocer el conjunto de términos que describe el corpus de liderazgo.

La segunda modificación al estudio de [76] tiene el mayor índice de *precision*, sin embargo, el esquema no recuperó la mayor parte de términos relevantes. Por otro lado, la entropía tiene un *recall* de 78.027% siendo menor al de IDF. La primera modificación al estudio de [76] recuperó el menor número de unigramas relevantes dado que C-Value desestimó palabras como *participative* pues son más frecuentes *participative leadership* y *participative management*. No obstante, este esquema recupera 81.96% de las colocaciones relevantes, por lo tanto, la métrica IDF es una ponderación apropiada para describir la terminología del liderazgo.

Lo anterior se confirma al analizar los resultados de la ponderación IDF que obtiene el mejor valor de *f-measure*, por ende, los términos en la referencia ocurren pocas veces en el conjunto de documentos. No obstante, se identifica que el *f-measure* de cada escenario es bajo en comparación con investigaciones [76], [88] que reportan medidas superiores a 70% al emplear una metodología similar para extraer términos. Esta situación puede explicarse porque los estudios citados filtran aquellos términos que no cumplen patrones léxicos extraídos de fuentes especializadas. El empleo de patrones en este trabajo no se consideró ya que no existe una base de conocimiento que contenga información sintáctica sobre términos para el dominio tratado.

Igualmente, en los resultados señalados en la Tabla 2 se puede asociar que el *Gold standard* es resultado del trabajo humano, por ende, es posible que los listados de términos extraídos capturen datos no considerados por la persona que construyó el listado de referencia [78]. Dados los argumentos expuestos, el valor *f-measure* del listado de términos adquirido mediante la métrica IDF es aceptable. Aun cuando este índice es menor al reportado en otras investigaciones. Por ende, el vocabulario construido mediante el esquema IDF fue empleado como insumo de entrada para la identificación de los conceptos del corpus.

3.3 Fase III: Conceptos

Este estudio segmentó el corpus siguiendo la división 5-folds para valorar los constructos LDA en textos de testeo. De esta forma, 119 documentos constituyeron el conglomerado de entrenamiento y 52 fueron utilizados en evaluación. Siguiendo el esquema planteado en la ecuación 3, el modelo LDA fue calibrado al examinar los datos de entrenamiento. En particular, la aplicación de TC consideró el rango de 5 a 65 términos top dentro de cada concepto. Así el mayor valor de TC se obtuvo para 20 tópicos. El valor de la distribución previa del tema en el documento (α) fue de 2.15 y la distribución a priori del término en el tópico (η) de 1.3. Esto permitió un TC con media mínima de -1.8118 ± 0.0196 para $N=5$ y un valor máximo de -0.4225 ± 0.0145 para $N=65$, con un 95% de confianza. Además, la estrategia de filtrado descartó 5 temáticas.

Más aún, el modelo LDA construyó temáticas que obtuvieron un valor de 51.66 de *f-measure*, con una *precision* de 42.56 y *recall* 65.71. La Tabla 3 ejemplifica tres conceptos construidos manualmente donde en letra cursiva se señalan términos que el sistema recuperó y no están en el etiquetado manual. Es notorio

que entre los conceptos existen términos comunes que fueron recuperados de forma correcta. Sin embargo, estas temáticas representan constructos diferentes entre sí. Por ejemplo, *Hersey Blanchard situational leadership model*, *Vertical dyad linkage theory* y *Situational contingency theory* son conceptos pertenecientes a diferentes niveles dentro de la estructura taxonómica del dominio de liderazgo, además provienen de distintas corrientes teóricas relacionadas con las situaciones o el comportamiento y tienen asociados a ellos, estilos de liderazgo diferenciados.

Por lo anterior, la estrategia de filtrado aplicada permitió recuperar conceptos no redundantes.

Tabla 3. Ejemplos conceptos construidos mediante el modelo LDA

Hersey Blanchard situational leadership model
organizational outcome, <i>organizational commitment</i> , <i>knowledge</i> , effectiveness level, leader behavior, individual, performance, leadership effectiveness level, leader trait, follower, manager, experience, perception, people, ability, job satisfaction, effective, hersey blanchard situational leadership model, <i>respect</i> , <i>discussion</i> , relationship oriented, responsibility, communication, leader effectiveness level, satisfaction, training, initiate structure, direction, effective leadership, collaboration, motivation, interpersonal, autonomy, <i>leadership style</i> , <i>employee</i> , <i>leadership behavior</i> , maturity, directive, participate, job performance, participative, leader style, <i>positive organizational outcome</i> , <i>abusive supervision</i> , <i>power</i> , self-directedness, competence, task behavior, supportive, taxonomy, self-confidence, task oriented, follower development level, organizational citizenship behavior
Vertical dyad linkage theory
individualize consideration, in group, vertical dyad linkage theory, outcome, supervisor, perceive, job satisfaction, trust, effective, leader follower, positive relationship, organizational commitment, respect, commitment, authority, model leadership, opportunity, relational approach, effective leadership, subordinate satisfaction, exchange, job performance, self-interest, <i>mental model</i> , <i>moral</i> , <i>superior</i> , maturity, reward, empowerment, attention, transmission, organizational relationship, follower performance, <i>capacity</i> , <i>feedback</i> , <i>objective</i> , <i>participative</i> , tactic, organizational citizenship behavior, leader follower theory, dyad, social interaction, emotional intelligence
Situational contingency theory
follower, effectiveness level, leadership style, leader behavior, performance, situational contingency theory, supervisor, organizational commitment, servant leadership theory, effective, leadership effectiveness level, organizational culture, <i>moral</i> , <i>team performance</i> , <i>model leadership</i> , environment, responsibility, prefer co worker, autonomy, initiate structure, satisfaction, group performance, leader effectiveness level, participate, willingness, <i>pressure</i> , <i>feedback</i> , <i>enable</i> , <i>organizational performance</i> , maturity, task structure, task behavior, efficacy, development level, follower self-rating

*Los términos presentados surgen del procesamiento descritos antes.

La *precision* hallada es menor a la reportada en [89] quienes proponen emplear dos veces el modelo LDA para reconocer terminología de temáticas que son instancias de conceptos principales, de esta forma, reducen el tamaño del vocabulario y eliminan términos redundantes. No obstante, este enfoque no es apropiado para modelar el dominio de liderazgo porque en esta área existen constructos que comparten terminología (ver Tabla 3).

Por el contrario, esta investigación presenta una propuesta con un desempeño semejante a la reportada en [79] donde los autores agregan información de bases de conocimiento para brindar un contexto semántico a los términos, con el fin de mejorar el agrupamiento de unidades léxicas. En consecuencia, el estudio aquí expuesto presentó un sistema de aprendizaje ontológico que recupera términos y conceptos semejantes a la referencia manual sin la costosa necesidad de agregar conocimiento de recursos externos.

No obstante, la presente propuesta recupera 15 estructuras conceptuales cuando los humanos etiquetaron 95 conceptos. Más aún, las temáticas extraídas representan estructuras *gross-grained* ya que se relacionan con subtemas del liderazgo. Por lo anterior, la actual propuesta es inoportuna para la extracción de conocimiento detallado. Una posible razón de esta situación es el tamaño del corpus ya que [83] indica que LDA tiende a reconocer temáticas que abarcan particularidades del dominio cuando los corpus son pequeños.

4. CONCLUSIONES

El ordenamiento de la información dentro del dominio de liderazgo, desarrollado en este trabajo generó una especificación clara, concisa, bien estructurada y coherente de su existencia, lo que ayudará a romper el ciclo reforzante que ha impedido su crecimiento teórico acumulativo y subsanará la ausencia de trabajos que buscan contrarrestar su falta de parsimonia

Este trabajo también expone una propuesta para el aprendizaje ontológico de términos y conceptos a partir de textos, considerando las particularidades del liderazgo. En particular, se evaluó fiabilidad inter observador entre los etiquetadores manuales, después se estableció un vocabulario de trabajo mediante la ponderación IDF. Posteriormente, se recuperaron conceptos del liderazgo mediante el modelo LDA. La estrategia evaluativa de esta propuesta está basada en *Gold standard* considerando el glosario conceptual construido. Los hallazgos expuestos pueden ser la base para refinar una ontología en este campo.

El principal desafío en este trabajo fue el tratamiento e integración de la información, debido al gran número de términos, conceptos, relaciones y propiedades que debieron ser analizadas desde numerosas teorías, modelos y estilos de liderazgo provenientes de distintas corrientes, desconectadas o en desacuerdo entre sí, por ello, la representación del dominio de liderazgo en este glosario de conceptos fue un tema de relevancia, ya que ofreció la posibilidad de abarcar en una sola estructura de conocimiento diversas perspectivas; además desde el punto de vista teórico ayudó a precisar, visualizar, consolidar y documentar elementos estructurales dentro del campo de liderazgo.

Al unificar la información, también se garantizó un núcleo común para las interpretaciones futuras, lo que facilitará el esclarecimiento de conocimientos, reduciendo el uso de términos diferentes para referirse al mismo concepto. Así mismo, el vocabulario conciso del glosario creado persigue la generalidad y permite documentar el conocimiento, disminuyendo confusiones, ambigüedades, proliferación de información y superposiciones conceptuales o terminológicas, lo que impacta fortaleciendo el principio de parsimonia en esta área.

Futuras investigaciones estarán enfocadas en aplicar *topic modeling* jerárquicos y explotar la información sintáctica de los documentos con el fin de construir conceptos más precisos. Estas estrategias han sido implementadas en [90] donde los autores ejecutan un modelo jerárquico considerando la ubicación de los términos dentro del texto, beneficiando unidades léxicas en el título y conclusiones; en consecuencia, [90] reportan valores mayores a 90 puntos en *f-measure*. Igualmente, futuros estudios pueden abordar otras estrategias para la extracción de conceptos, de tal forma que establezcan temáticas particulares.

REFERENCIAS

- [1] J. Murphy, S. N. Elliott, E. Goldring, C. Porter, J. Murphy, S. N. Elliott, E. Goldring, and A. C. Porter, Leadership for learning: a research-based model and taxonomy of behaviors, *Sch. Leadersh. Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 179–201, 2007.
- [2] J. Pfeffer, *The Ambiguity of Leadership*, *Acad. Manag. Rev.*, vol. 1, pp. 104–113, 1977.
- [3] K. D. Mackenzie and F. B. Barnes, *The unstated consensus of leadership approaches*, *Int. J. Organ. Anal.*, vol. 15, no. 2, pp. 92–118, 2008.
- [4] G. Pérez-ortega, G. L. Jiménez-valdés, and G. Romo-morales, *Caracterización del liderazgo transformacional de los directivos de instituciones de educación superior. Caso de estudio en una universidad del departamento de Antioquia (Colombia)*, *Entramado*, vol. 13, no. 1, pp. 48–61, 2017.
- [5] W. Friedman, *Leadership and History*, in *Handbook of Leadership Theory and Practice*, Boston: Harvard Business Press, 2010, pp. 291–304.
- [6] B.M. Bass., *Handbook of leadership: A survey of theory and research*, Free Press. New York, 1990.
- [7] J. G. (Jerry)Hun. Mark F.Peterson, International perspectives on international leadership, *Leadersh. Q.*, vol. 8, no. 3, pp. 203–231, 1997.
- [8] W. H. Rendova, V. P., & Starbuck, *Ancient Chinese theories of control.*, *J. Manag. Inq.*, vol. 6, pp. 144–159, 1997.
- [9] R. Hamilton, *Ancient Egypt: The Kingdom of the Pharaohs*. Parragon Inc, 2007.
- [10] J. A. Murray, *The Oxford English dictionary*, Oxford: Ox. 1933.
- [11] J. M. F. Velasco y Ramirez, *Representaciones conceptuales de los atributos del liderazgo y de inteligencia emocional en la significación de un líder ideal para el siglo XXI en un contexto organizacional*, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2013.
- [12] R. Stogdill, *Personal factors associated with leadership: a survey of the literature*, *J. Psy.*, vol. 25, pp. 35–71, 1948.
- [13] R. . Stogdill and A. . Coons, *Leader Behavior, its description and measurement*. Columbus: College of Administrative Science, Ohio State University, 1957.
- [14] F. . Fiedler, *A theory of leadership effectiveness*. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [15] F. Dansereau, G. Graen, and W. Haga, *A Vertical Dyad Linkage Approach to Leadership within Formal Organizations: A Longitudinal Investigation of the role MP*, *Org. Beh.. Hum. Per.*, vol. 13, pp. 46–78, 1975.

- [16] B. M. Bass, *Leadership and performance beyond expectations*. New York: Free Press, 1985.
- [17] R. A. Heifetz, *Leadership without Easy Answers*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994.
- [18] D. Lane and R. Maxfield, *Strategy under Complexity: Fostering Generative Relationships, Long Range Plann.*, vol. 29, no. 2, pp. 215–231, 1996.
- [19] D. Hock, *The Art of Chaordic Leadership*, in *On Mission and Leadership: A leader to leader Guide*, San Francisco: Jossey-Bass, 2000.
- [20] P. Gronn, *Distributed leadership as a unit of analysis, Leadersh. Q.*, vol. 13, pp. 423–451, 2002.
- [21] C. L. Pearce and J. . Conger, *All Those Years Ago: The Historical Underpinnings of Shared Leadership*, in *Shared Leadership: Reframing the Hows and Whys of Leadership*, C. L. Pearce and J. A. Conger, Eds. Thousand Oaks: Sage Publications, 2003, pp. 1–18.
- [22] G. Surie and J. Hazy, *Generative leadership: Nurturing innovation in complex systems, E:CO*, vol. 8, no. 4, pp. 13–26, 2006.
- [23] J. Gómez Badillo, *Liderazgo: Rasgos, Funciones y Estilos*, Universidad de la Sabana, 2005.
- [24] R. N. Lussier and C. F. Achua, *Liderazgo: Teoría, aplicación, desarrollo de habilidades*. México. D.F., 2005.
- [25] E. A. Fleishman, M. D. Mumford, S. J. Zaccaro, G. M. Un, K. Y. Levin, A. L. Korotkin, and M. Hein, *Taxonomic efforts in the description of leader behavior: A synthesis and functional interpretation, Leadersh. Q.*, vol. 2, no. 4, pp. 245–287, 1991.
- [26] G. Yukl, T. Taber, and A. Gordon, *A Hierarchical Taxonomy of Leadership Behavior: Integrating a Half Century of Behavior Research, J. Leadersh. Organ. Stud.*, vol. 9, no. 1, pp. 15–32, 2002.
- [27] D. S. Derue, J. D. Nahrgang, N. Wellman, and S. E. Humphrey, *Trait and behavioral theories of leadership: An integration and Meta-Analytic test of their relative validity, Pers. Psychol.*, vol. 64, pp. 7–52, 2011.
- [28] J. Antonakis and R. J. House, *The full- Range Leadership Theory: The Way Forward, Monogr. Leadersh. Manag.*, vol. 2, pp. 3–33, 2002.
- [29] R. J. House and R. N. Aditya, *The Social Scientific Study of Leadership: Quo Vadis?, J. Manage.*, vol. 23, no. 3, pp. 409–473, 1997.
- [30] G. Yukl, *Managerial Leadership: A Review of Theory and Research, J. Manage.*, vol. 15, no. 2, pp. 251–289, 1989.
- [31] G. Yukl, *Effective Leadership Behavior: What We Know and What Questions need more attention, Acad. Manag. Perspect.*, vol. 26, no. 4, pp. 66–85, 2012.
- [32] G. Yukl, *An Evaluative Essay on Current Conceptions of Effective Leadership, Eur. J. Work Organ. Psychol.*, vol. 8, no. 1, pp. 33–48, 1999.
- [33] G. Yukl and P. Hall, *Leadership in Organizations*. 2002.
- [34] F. Schmidt, *Detecting and Correcting the Lies That Data Tell, Perspect. Psychol. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 233–242, 2010.
- [35] G. C. Banks, J. Gooty, R. L. Ross, C. E. Williams, and N. T. Harrington, *Construct redundancy in leader behaviors: A review and agenda for the future, Leadersh. Q.*, vol. 29, no. 1, pp. 236–251, 2018.
- [36] G. C. Banks, K. N. Engemann, C. E. Williams, J. Gooty, K. Davis, and M. R. Medaugh, *A meta-analytic review and future research agenda of charismatic leadership, Leadersh. Q.*, vol. 28, pp. 508–529, 2016.
- [37] G. C. Banks, K. Davis, W. L. Gardner, and C. E. Guler, *A meta-analytic review of authentic and transformational leadership: A test for redundancy, Leadersh. Q.*, vol. 27, pp. 634–652, 2016.
- [38] J. E. Hoch, W. H. Bommer, J. H. Dulebohn, and D. Wu, *Do Ethical, Authentic, and Servant Leadership Explain Variance Above and Beyond Transformational Leadership? A Meta-Analysis, J. Manage.*, vol. 44, no. 2, pp. 501–529, 2018.
- [39] D. Montano, A. Reeske, F. Franke, and J. Hüffmeier, *Leadership, followers' mental health and job performance in organizations: A comprehensive meta-analysis from an occupational health perspective, J. Organ. Behav.*, vol. 38, pp. 327–350, 2016.
- [40] P. Behrendt, S. Matz, and A. S. Göritz, *An integrative model of leadership behavior, Leadersh. Q.*, vol. 1, pp. 229–244, 2016.
- [41] R. P. Tett, H. A. Guterman, A. Bleier, and P. J. Murphy, *Development and Content Validation of a Hyperdimensional Taxonomy of Managerial Competence, Hum. Perform.*, vol. 13, no. 3, pp. 205–251, 2000.
- [42] W. H. Drath, C. D. Mccauley, C. J. Palus, E. Van Velsor, P. M. G. O. Connor, and J. B. Mcguire, *Direction, alignment, commitment: Toward a more integrative ontology of leadership, Leadersh. Q.*, vol. 19, no. 6, pp. 635–653, 2008.
- [43] T. Reunanen and Jaana Kaitonen, *Different Roles in Leadership Styles in Modern Organization*, in *Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Factors, Business Management and Society*, 2016, pp. 250–262.
- [44] T. Reunanen and Marko Junno, *Leadership Focus in Modern Expert Organization*, in *Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Factors, Business Management and Society*, 2016, pp. 978–991.
- [45] J. Packendorff, L. Crevani, and M. Lindgren, *Project Leadership in Becoming: A Process Study of an Organizational Change Project, Proj. Manag. J.*, vol. 45, no. 3, pp. 5–20, 2014.
- [46] W. W. Souba, *The Being of Leadership, Philos. Ethics, Humanit. Med.*, vol. 6, no. 5, pp. 1–11, 2011.
- [47] N. O. Martins, *An ontology of power and leadership, J. Theory Soc. Behav.*, vol. 1, no. August 2016, pp. 1–15, 2017.

- [48] J. Rowold, L. Borgmann, and M. Diebig, *A Tower of Babel? - Interrelations and structure of leadership constructs*, *Leadersh. Organ. Dev. J.*, vol. 36 (2), pp. 137–160, 2015.
- [49] T. A. Judge, R. F. Piccolo, and R. Ilies, *The Forgotten Ones? The Validity of Consideration and Initiating Structure in Leadership Research*, *J. Appl. Psychol.*, vol. 89, no. 1, pp. 36–51, 2004.
- [50] R. Stogdill, *Handbook of leadership: A survey of theory and research*. New York: Free Press, 1974.
- [51] S. E. Markham, *Leadership , levels of analysis , and déjà vu: Modest proposals for taxonomy and cladistics coupled with replication and visualization*, *Leadersh. Q.*, vol. 21, no. 6, pp. 1121–1143, 2010.
- [52] S. Mishra and S. Jain, *A study of various approaches and tools on ontology*, *Proc. - 2015 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Technol. CICT 2015*, pp. 57–61, 2015.
- [53] S. Gillani and A. Kö, *ProMine: A Text Mining Solution for Concept Extraction and Filtering*, *Knowl. Manag. Organ. Learn.*, vol. 2, pp. 59–82, 2016.
- [54] M. N. Asim, M. Wasim, M. U. G. Khan, W. Mahmood, and H. M. Abbasi, *A survey of ontology learning techniques and applications*, *Database*, vol. 2018, no. 2018, 2018.
- [55] M. Clark, Y. Kim, U. Kruschwitz, D. Song, D. Albakour, S. Dignum, U. C. Beresi, M. Fasli, and A. De Roeck, *Automatically structuring domain knowledge from text: An overview of current research*, *Inf. Process. Manag.*, vol. 48, no. 3, pp. 552–568, 2012.
- [56] W. Wong, W. Liu, and M. Bennamoun, *Ontology learning from text: A look back and into the future*, *ACM Comput. Surv.*, vol. 44, no. 4, 2012.
- [57] F. Baião, F. Santoro, H. Iendrike, C. Cappelli, M. Lopes, V. T. Nunes, and A. P. Dumont, *Towards a data integrations approach base don business process models and domain ontologies*, in *Proc. 2008 Tenth International Conference on Enterprise Information Systems - ISAS*, 2008, pp. 338–342.
- [58] M. Barrera, H. Núñez, and E. Ramos, *Ingeniería Ontológica. Lecturas en ciencias de la computación*, Escuela de Computación Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 2012.
- [59] A. Gómez Pérez, M. Fernandez Lopez, and O. Corcho, *Ontological Engineering*. London: Springer Verlag, 2004.
- [60] D. Corrêa, *Representing organizational structures in enterprise architecture: An Ontology - Based Approach*, Universidade Federal Do Espírito Santo, 2015.
- [61] H. S. Pinto and J. P. Martins, *Ontologies : How can They be Built ?*, *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 6, pp. 441–464, 2004.
- [62] M. Fox, M. Barbuceanu, and M. Gruninger, *An Organisation Ontology for Enterprise Modelling: Preliminary Concepts for Linking Structure and Behaviour*, in *4th Workshop on Enabling Technologies, Infrastructure for Collaborative Enterprises (WET-ICE'96)*, 1995, pp. 71–81.
- [63] M. Uschold and M. Gruninger, *Ontologies : principles , methods and applications*, *Knowl. Eng. Revie*, vol. 11, no. 2, pp. 93–136, 1996.
- [64] Ú. Martos Cruz, *Liderazgo en los grupos de trabajo*, Universidad de Jaén, 2016.
- [65] D. Giraldo and J. Naranjo, *Liderazgo: Desarrollo del concepto, evolución y tendencias*, Univ. del Rosario, 2014.
- [66] R. Daft, *The Leadership Experience*, 6a edición. 2014.
- [67] R. . House, *Robert J. House A Path Goal Theory of Leader Effectiveness*, *Adm. Sci. Q.*, vol. 16, no. 3, pp. 321–339, 1971.
- [68] M. L. Perugini and A. C. Solano, *Estudios sobre el liderazgo. Teorías y evaluación.*, *Psicodebate. Psicol. Cult. y Soc.*, vol. 19, no. 1215, pp. 107–122, 2013.
- [69] T. R. Chen, *Team Composition, Emergent States, and Shared leadership Emergence on Project Teams: A Longitudinal Study*, George Mason University, 2014.
- [70] D. L. Gilstrap, *A COmplex Systems Framework for Research on Leadership and Organizational Dynamics in Academic Libraries*, no. 1, pp. 57–77, 2009.
- [71] D. Walters, *Leadership issues in governance of complex systems*, *Int. J. Syst. Syst. Eng.*, vol. 7, no. 1/2/3, pp. 130–142, 2016.
- [72] O. Levy, Y. Goldberg, and I. Dagan, *Improving Distributional Similarity with Lessons Learned from Word Embeddings*, *Trans. Assoc. Comput. Linguist.*, vol. 3, pp. 211–225, 2015.
- [73] D. Jurafsky and J. Martin, *Speech and language processing: an introduction to natural language processing*. Prentice Hall, 2009.
- [74] A. J. Viera and J. M. Garrett, *Understanding interobserver agreement: The kappa statistic*, *Fam. Med.*, vol. 37, no. 5, pp. 360–363, 2005.
- [75] N. A. Astrakhantsev, D. G. Fedorenko, and D. Y. Turdakov, *Methods for automatic term recognition in domain-specific text collections: A survey*, *Program. Comput. Softw.*, vol. 41, no. 6, pp. 336–349, 2015.
- [76] J. Ochoa, R. Valencia-García, A. Perez-Soltero, and M. Barceló-Valenzuela, *A semantic role labelling-based framework for learning ontologies from Spanish documents*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, pp. 2058–2068, 2013.
- [77] M. Gómez-Suta, J. D. Echeverry-Correa, and J. A. Soto-Mejía, *Semi-automatic extraction and validation of concepts in ontology learning from texts in Spanish*, in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2020, vol. Part F1625, pp. 7–16.
- [78] A. Konys, *Knowledge repository of ontology learning tools from text*, in *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems*, 2019, vol. 159, pp. 1614–1628.

- [79] R. Y. K. Lau, J. Leon Zhao, W. Zhang, Y. Cai, and E. W. T. Ngai, *Learning context-sensitive domain ontologies from folksonomies: A cognitively motivated method*, *INFORMS J. Comput.*, vol. 27, no. 3, pp. 561–578, 2015.
- [80] D. M. Blei, A. Y. Ng, and M. I. Jordan, *Latent Dirichlet allocation*, *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 3, no. 4–5, pp. 993–1022, 2003.
- [81] J. Chang, J. Boyd-Graber, S. Gerrish, C. Wang, and D. M. Blei, *Reading tea leaves: How humans interpret topic models*, *Adv. Neural Inf. Process. Syst. 22 - Proc. 2009 Conf.*, pp. 288–296, 2009.
- [82] M. Rani, A. K. Dhar, and O. P. Vyas, *Semi-automatic terminology ontology learning based on topic modeling*, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 63, pp. 108–125, 2017.
- [83] S. Syed and M. Spruit, *Full-Text or abstract? Examining topic coherence scores using latent dirichlet allocation*, in *Proceedings - 2017 International Conference on Data Science and Advanced Analytics, DSAA 2017*, 2017, vol. 2018-Janua, pp. 165–174.
- [84] T. Nomoto and Y. Matsumoto, *A new approach to unsupervised text summarization*, *SIGIR Forum (ACM Spec. Interes. Gr. Inf. Retrieval)*, pp. 26–34, 2001.
- [85] A. Louis and A. Nenkova, *Automatically assessing machine summary content without a gold standard*, *Comput. Linguist.*, vol. 39, no. 2, pp. 267–300, 2013.
- [86] D. Mimno, H. M. Wallach, E. Talley, M. Leenders, and A. McCallum, *Optimizing semantic coherence in topic models*, in *EMNLP 2011 - Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Proceedings of the Conference*, 2011, no. 2, pp. 262–272.
- [87] C. Silva and B. Ribeiro, *Inductive Inference for Large Scale Text Classification*, vol. 255. Springer, 2010.
- [88] K. Meijer, F. Frasincar, and F. Hogenboom, *A semantic approach for extracting domain taxonomies from text*, *Decis. Support Syst.*, 2014.
- [89] Z. Xu, M. Harzallah, F. Guillet, and R. Ichise, *Modular ontology learning with topic modelling over core ontology*, in *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 159, pp. 562–571.
- [90] X. Zhu, D. Klabjan, and P. N. Bless, *Unsupervised terminological ontology learning based on hierarchical topic modeling*, in *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 32–41.
- [91] Á. Vázquez Alonso and M. A. Manassero Mas, *Características del conocimiento científico: creencias de los estudiantes*, *Enseñanza las Ciencias*, vol. 17, no. 3, pp. 377–395, 1999.
- [92] J. A. Troyano, M. Mejías, J. Torres, and T. Miguel, *Extensiones al sistema de clasificación de UML*, *Comput. y Sist.*, vol. 3, no. 3, pp. 202–213, 2000.
- [93] R. Studer, V. R. Benjamins, and D. Fensel, *Knowledge Engineering: Principles and Methods*, *Data Knowl. Eng.*, vol. 25, pp. 161–197, 1998.
- [94] I. Chalmers, L. V Hedges, and H. Cooper, *A Brief History of Research Synthesis*, *Eval. Heal. Prof.*, vol. 25, no. 1, pp. 12–37, 2002.
- [95] J. A. Martínez, *Endogeneidad, diferencia de medias y regresión*, *Rev. Int. Cienc. Deporte*, vol. XII, no. 46, pp. 335–337, 2016.
- [96] P. Laplante, Ed., *Dictionary of Computer Science Engineering and Technology*, 1 edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000.
- [97] R. Mizoguchi, *Tutorial on ontological engineering -Part 1: Introduction to Ontological Engineering*, *New Gener. Comput.*, vol. 21, no. 4, pp. 365–384, 2003.
- [98] J. Gómez, *Las unidades léxicas en español*, 2004.
- [99] R. Eito Brun and J. Senso, *Minería textual*, *El Prof. la Inf.*, vol. 13, no. 1, pp. 11–27, 2004.
- [100] *Oxford Dictionary of English*. Oxford University Press, 2010.

Fomento de aprendizajes para el cuidado profesional de enfermería mediante el uso de tecnologías

Delvis Mejía Álvarez¹

María Inés Mantilla-Pastrana²

Feliz Javier Villero Mejía³

Doris Marina Cerchiaro-Fernández⁴

Edgardo Muñoz Beltrán⁵

^{1,4}Universidad Popular del Cesar

³Universidad Nacional de Colombia

^{2,5}Red Internacional de Enfermería Informática
Colombia

La disciplina de enfermería cuenta con bases epistemológicas donde el saber de otras profesiones aporta a la adquisición de habilidades, como el uso de las tecnologías para desarrollar estrategias educativas que el enfermero puede utilizar para cuidar la salud humana. El objetivo de este trabajo es crear estrategias educativas mediadas por tecnología para el cuidado profesional de enfermería. Se realizó un estudio pre-experimental, transversal, de tipo explicativo, entre el 2015 y 2019, y una prueba diagnóstica con 8 reactivos sobre conocimientos de tecnologías a 250 estudiantes, población inscrita al segundo semestre de enfermería en la Universidad Popular del Cesar UPC; se realizó un seminario-taller ST dirigido por ingeniería de sistemas sobre las propiedades y uso de la tecnología, enfocado a estrategias educativas mediadas por tecnologías a partir de planes de cuidado básico profesional; luego, una prueba final para identificar las habilidades sobre el manejo y uso de la tecnología. La prueba diagnóstica demostró que el 39% de la población considera conocer y usar apropiadamente la tecnología asociada al campo de la salud, y que el 58% considera que ha sido muy poca. Luego del ST el 85% aceptó conocer, y el 100% expresó reconocer las tecnologías y aplicarlas en su entorno para el cuidado básico profesional; los estudiantes desarrollaron habilidades en el uso de las herramientas web 3.0 que promueven el cuidado de la salud. Se logró fomentar el aprendizaje de los estudiantes de enfermería sobre el uso de las tecnologías para el cuidado profesional de la salud humana, cuyas estrategias educativas están mediadas por tecnología.

¹ Magíster en Educación en Línea.

Contacto: delvismejia@unicesar.edu.co

² Magíster Enfermería y Doctor en Educación.

Contacto: mariainesmantilla@gmail.com

³ Ingeniero de Petróleo.

Contacto: fvillerom@unal.edu.co

⁴ Abogada, Enfermera y Magíster en Educación.

Contacto: doriscerchiaro@unicesar.edu.co

⁵ Magíster en Salud Pública y Doctor en Educación.

Contacto: ejamub@yahoo.com.ar

1. INTRODUCCIÓN

El cuidado profesional de enfermería responde a las necesidades de la salud humana de manera integral, cuyo propósito general corresponde a *promover la salud, prevenir la enfermedad, intervenir en el tratamiento, rehabilitación y recuperación de la salud, aliviar el dolor, proporcionar medidas de bienestar y contribuir a una vida digna de la persona* [1], situaciones que retan el trabajo interprofesional hacia la educación para la salud mediada por tecnología.

Educación para la salud que es responsabilidad de todas las áreas disciplinares y que en el momento actual tanto la globalización, el acceso a medios masivos de comunicación, como los beneficios del crecimiento de la tecnología han influenciado todos los aspectos de la cultura del ser humano, la medicina y el tratamiento médico resulta ser uno más de aquellos contextos de desarrollo humano que se han visto influenciados por la masiva y eficaz, inclusión de la tecnología en el campo de la medicina [2, 3].

Por lo anterior, se busca hacer partícipes a los estudiantes de enfermería de los procesos de cambios generacionales supliendo las necesidades de cuidado profesional actuales con eficiencia mediante TIC, para lo que es necesario cualificarse en la aplicación de la tecnología ya sea a través de aplicaciones, simuladores software o mecanismos electromecánicos y aparatos tecnológicos, con la posibilidad de establecer ciertas circunstancias de vida, en procesos de observación, tratamiento en el paciente o estrategias de educación para promover la salud y prevenir la enfermedad de la persona, la familia o las comunidades.

Esta experiencia didáctica de los ST, buscan el fomento de los aprendizajes de los enfermeros que se encuentran en formación para que se utilicen las tecnologías de la información y la comunicación-TIC en pro del cuidado al paciente, aprovechando todo su potencial y promoviendo la eficiencia del trabajo interdisciplinar para el cuidado de la salud humana; teniendo en cuenta que, la disciplina del enfermero vela porque *el conocimiento científico y la tecnología, como matrices de desarrollo, imponen modelos y parámetros a las políticas públicas* [4] al respecto, políticas que promueven la salud de las comunidades como un beneficio social, específico de cada profesión donde el trabajo colaborativo y cooperativo es fundamental.

Ahora bien, las TIC se emplean en aras de facilitar la enseñanza, recursos virtuales que agilizan el aprendizaje, posibilita la interacción e integración de diferentes fuentes [5]; la flexibilidad de dichas tecnologías permite que se empleen herramientas que sean transversales a las diversas disciplinas, tornándose en un instrumento versátil, lo que permite que siempre que se implemente la herramienta de forma correcta se haga más fácil el aprendizaje de la enseñanza. Por lo tanto, es necesario el educar a las futuras generaciones de profesionales al uso correcto de las nuevas tecnologías, ya que, como se ejemplifican en el caso de la migración de la violencia en forma de *CyberBullying* las tecnologías pueden ser utilizadas para fines destructivos, así, también el buen uso de esta es parte de la solución [6].

Al respecto, las TIC favorecen la trasmisión masiva del conocimiento a comunidades que requieren conocer la forma de cuidar su salud y que al ser acompañados por profesionales de enfermería podrían construir planes de control que favorezcan la intervención de aquellos determinantes que afectan la salud, como una estrategia para promover la salud y prevenir la enfermedad.

De tal manera que, ésta experiencia didáctica pretende fomentar los aprendizajes sobre las TIC suplir las necesidades de cuidado de las comunidades donde las estrategias educativas permitan la intervención del enfermero, donde se adquieran habilidades integrales no solo para que sean capaces de manipular los medios tecnológicos, sino de responsabilizar, analizar y orientar su conocimiento hacia el uso adecuado de los mismos para hacer cada vez más certera su utilización y más humano el trato al paciente que es fundamental para aprender sobre los cuidados básicos de todo plan de estudios.

2. MÉTODO

Este estudio pre-experimental, *utilizados en investigación en el ámbito de las ciencias sociales y en especial en educación* [7], de corte transversal, de alcance explicativo, realizado entre 2015 y 2019 en la Universidad

Popular del Cesar. Con una muestra de estudiantes de enfermería seleccionados en forma intencional y consecutiva, los cuales firmaron de manera voluntaria el consentimiento informado previamente a su participación.

2.1 Participantes

Se incluyeron 250 estudiantes de enfermería que cursaban entre primer y cuarto semestre. En cada periodo hubo entre 30 a 50 estudiantes que obedecen a dos grupos de estudiantes del programa de enfermería periodo a periodo. Los participantes tenían un rango de edad entre 17 y 30 años, que se encontraban con matrícula vigente presencial en asignaturas de cuidados básicos de enfermería y se excluyeron de la investigación los participantes que no firmaron consentimiento informado.

2.2 Procedimiento

Previo a la aplicación de la estrategia educativa, se aplicó una prueba diagnóstica a los grupos de primeros niveles académicos (primer a cuarto semestre), con el fin de determinar el conocimiento, manejo y uso de la tecnología que aplican los estudiantes en su entorno; posteriormente, los estudiantes fueron instruidos sobre el uso de las herramientas tecnológicas (hardware y software) para el cuidado y atención de los pacientes por parte del profesional de enfermería; finalmente, se repitió el test sobre aplicación de medios tecnológicos.

2.3 Instrumento

Se elaboró un formulario para la recolección de los datos con ocho ítems divididas en 4 apartados: 1) Conocimiento respecto a la tecnología: se calificó en una escala dividida en cuatro categorías (malo, regular, bueno, excelente); 2) Uso apropiado de la tecnología asociada al área de la salud: se establecieron tres categorías de selección (conocimiento somero, poco conocimiento, conocimiento suficiente); 3) Importancia del uso de la tecnología en el cuidado humano: se establecieron cuatro categorías de selección (no maneja los términos, ni está seguro de cuál es la importancia, considera importante, pero no sabe de sus alcances); y 4) Aplicación de la tecnología en su entorno: se calificó en una escala dividida en cinco categorías (Aplica la tecnología con fines pertinentes al entorno de la salud; aplica a fines diferentes al conocimiento o manejo del área de la salud, no considera su entorno el área de la salud, conocimiento específico o básico de las tecnologías).

2.4 Estrategia educativa

La aproximación a los estudiantes fue a través de un ST enfocado en el uso de la tecnología web 3.0, videos, mapas mentales, presentaciones en herramientas online, pág. web, blog, donde los estudiantes eran los protagonistas pasando de un rol pasivo a un rol activo; posteriormente, se emplearon algoritmos en el contexto del cuidado de enfermería en urgencias y en unidad de cuidado intensivo, con el fin de desarrollar discusiones académicas en el aula al respecto de la utilización asertiva de los elementos y cuidados que se deben tener tanto desde el rol enfermero como con el paciente, respecto a la aplicación del uso tecnológico en su cuidado profesional.

El apoyo a la gestión del conocimiento se desarrolló a través del estudio y contó con una base de datos consolidada sobre los diversos equipos electrónicos usados en la rama de la salud: libros electrónicos, página web, videos, mapas mentales en línea sobre la utilidad, ventajas y desventajas de cada equipo tecnológico utilizado en la salud.

Se instruyó al grupo de participantes para ser capaces de transferir su conocimiento y aportaran a procesos investigativos dentro del análisis descriptivo de la realidad actual del cuidado de enfermería, y lo asociaran a su entorno académico como laboral. Se buscó que la experiencia fuera enriquecedora para los estudiantes, quienes no solamente se nutrían de la temática, sino que también se veían abocados a usar todas sus competencias al enfrentarse a retos en el seminario, que les permitían encontrar dentro de sí habilidades y fortalezas en su rol como enfermeros.

2.5 Análisis estadístico

Se calcularon medidas de dispersión y tendencia central para diagnosticar el comportamiento de los estudiantes antes y después de la implementación de la estrategia educativa.

3. RESULTADOS

Las pruebas diagnósticas a los estudiantes mediante el formulario se denotan en las Figuras 1 a 4, donde la gráfica inicial representa el proceso de saberes previos y finalmente, convergen en una nueva con los resultados posterior al ST; de tal manera que, en ellos se aprecia el efecto de la enseñanza del uso de las TIC enfocado al cuidado humanizado del paciente, como se expresa en la Figura 1.

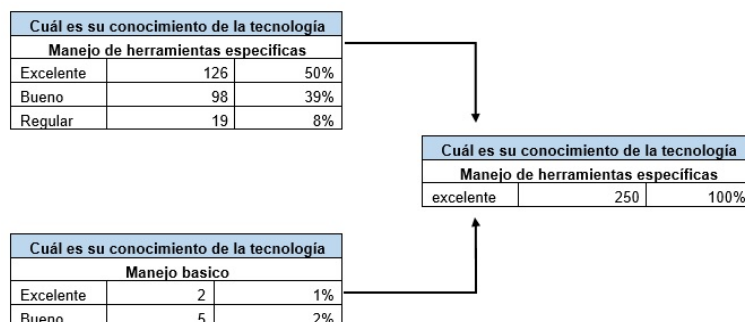


Figura 1. Conocimiento tecnológico al iniciar el proceso y al finalizar el proceso académico

De otra manera, el manejo y visión de los recursos y medios tecnológicos del estudiante consideración del conocimiento y uso apropiado de las tecnologías asociado al campo de la salud; al iniciar y finalizar el proceso académico, se describe en la Figura 2.

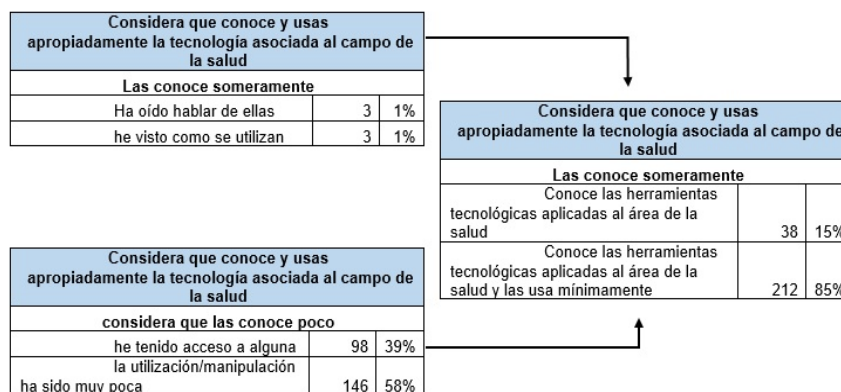


Figura 2. Consideración del conocimiento y uso apropiado de las tecnologías asociado al campo de la salud

Los estudiantes generaron además del conocimiento en la identificación y manejo de las herramientas particulares para el cuidado humano, competencias en el manejo de herramientas de la web 3.0, orientadas a la creación de material para publicación en la red de todo tipo, expositivo, demostrativo, dependiendo de las temáticas y el público objetivo, yendo más allá de la socialización en el claustro universitario, dando no solo difusión a la institución, sino manifestando el grado de pertinencia social que estando desarrollando los estudiantes en formación.

Esto revela que mediante este tipo de ejercicios académicos se está formando de manera integral al estudiante para que pueda afrontar los procesos académicos de manera estructurada y con apoyo tanto de las herramientas metodológicas como las tecnológicas apropiadas.

Así mismo, el Manejo y visión de los recursos y medios tecnológicos del estudiante Identificación de la importancia de la aplicación de la tecnología en el cuidado humano de manera específica, al iniciar y finalizar el proceso académico, como se describe en la Figura 3.

Sabes cuál es la importancia de la aplicación de la tecnología en el cuidado humano de manera específica		
No maneja los términos, ni está seguro de cuál es la importancia	139	56%
considera importante pero no sabe los alcances	111	44%

Sabes cuál es la importancia de la aplicación de la tecnología en el cuidado humano de manera específica		
Maneja los términos está seguro de cuál es la importancia	226	90%
considera importante pero no sabe los alcances	26	10%

Figura 3. Identificación de la importancia de la aplicación de la tecnología en el cuidado humano de manera específica

Finalmente, el manejo y visión de los recursos y medios tecnológicos del estudiante sobre cómo aplica la tecnología a su entorno, al iniciar y finalizar el proceso académico, se puede observar en la Figura 4.

Como aplica la tecnología a su entorno		
Aplica la tecnología a fines pertinentes al entorno de la salud	0	0%

Como aplica la tecnología a su entorno		
Aplica a fines diferentes al conocimiento o manejo del área de la salud, no considera su entorno el área de la salud		
comunicación personal	192	77%
juegos	52	21%
ocio	6	2%

Como aplica la tecnología a su entorno		
Aplica a fines diferentes al conocimiento o manejo del área de la salud, no considera su entorno el área de la salud		
Si	250	100%

Figura 4. Cómo aplica el estudiante la tecnología a su entorno

Es importante que, desde la academia se reflexione sobre el uso responsable de la tecnología para el cuidado del paciente es viable, esto soportado en los resultados obtenidos por grupos de estudiantes donde existe un contraste positivo evidente en cuanto al manejo y visión de los recursos y medios tecnológicos del estudiante al iniciar el proceso académico como en su finalización, lo que indica que el proceso de investigación cumple con los objetivos de concientizar de manera responsable a los estudiantes en el manejo de la tecnología para el cuidado del paciente.

Se evidencian las falencias en el conocimiento básico de los estudiantes con respecto a la tecnología de un 97% llegando a un 100% en el conocimiento de nuevas opciones de las TIC y precisa herramientas en su área disciplinar tras la aplicación de metodologías en clase como evidencia del trabajo interdisciplinar para la creación de estrategias que promuevan la salud de las comunidades.

De otra parte, la percepción del conocimiento varió considerablemente y a que, de solo conocer las herramientas asociadas a la salud poco 98% de la población y conocerlas someramente un 2%, se pasó a conocer las herramientas tecnológicas aplicadas a áreas de la salud en un 15% y, además de conocerlas, también usarlas mínimamente en 85%, donde se destaca la labor docente que proyecto de aula se socializaron, identificaron e implementó el uso de herramientas para apropiar al estudiantado del conocimiento.

En este orden de ideas el conocimiento acerca de la importancia de la aplicación de la tecnología en el cuidado humano de manera específica se vio ampliado, ya que se llegó a fomentar su uso en un 90% de la población, lo que contrasta con la dispersión del pensamiento en el grupo al iniciar, donde el 45% de la población consideraba su importancia pero no conocía los alcances de su uso y el restante 55%, no sabía nada al respecto de esta condición, condición que fue cambiada de manera radical tras someter a los grupos a un proceso de aplicación e interiorización de saberes pertinentes al área disciplinar.

Pero sin lugar a dudas uno de los tópicos que son definitivos es el hecho de que el 100% de la población cambió su referente en cuanto que se pasó de la aplicación de la tecnología a fines diferentes al conocimiento para el fomento de la salud; por otra parte, considerar que se conoce y aplica la tecnología en su entorno disciplinar enfermero, reconociendo a la salud y el trabajo interdisciplinar para fomentar el desarrollo de estrategias mediadas por TIC como herramienta para la promoción de la salud.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El cuidado del ser humano, es un objeto de investigación central en las ciencias de la salud, pero es también conocido que a medida que se van incluyendo los avances tecnológicos en el campo de la salud se da la construcción de nuevos modelos para el manejo de los cuidados; en éste sentido, sobre tecnología y

humanización de los cuidados, en contextos tecnológicos en gran medida requiere el reconocimiento de los avances y desarrollos tecnológicos como medios, no fines, para la atención y el cuidado de las personas [8].

La tecnología a veces, es el único medio por el cual se pueden satisfacer deseos humanos, por lo tanto no es la tecnología la responsable de la pérdida de humanidad en los ambientes tecnológicos, al parecer la responsabilidad descansa más en la técnica; lo que sustenta la forma en la que se debe orientar a los enfermeros en formación no solo hacia el conocimiento de la tecnología sino a la utilización de la misma con fines de los manejos más sensibles del ser humano, asociados a los medios tecnológicos apropiados; lo que implica que el estudiante interioriza la idea de que como gestor de cuidado del paciente su labor va mucho más allá de conocer las herramientas y medios tecnológicos, es la de conjugar su conocimiento en lo procedimental con lo que asocia la conciencia del ser humano donde cada paciente independientemente de los procedimientos es un ser único y especial.

El otro aspecto relevante en el ejercicio investigativo es que evidentemente la tecnología y la educación deben y de hechos se constituyen en una fuerza inseparable, pero que se nutre de la proyección asertiva en relación con los temas, es así como se pasa de la manipulación estrictamente social y poco fiable, al uso de herramientas con sentido y objetivo académico dentro del marco de las temáticas de enfermería.

Al establecer el referente de la forma y el tipo de utilización que los estudiantes daban a los recursos y medios tecnológicos e incluso su visión de ellos, acorde con el seguimiento de la investigación, está varió en un 100%, como se logre evidenciar en la Figura 4, donde registra el cambio radical, de la percepción inicial de los estudiantes hacia un claro desinterés y desconocimiento en la utilización de herramientas específicas de tecnología en su área de formación hacia la manifestación de conocimiento del uso de las mismas y sus implicaciones en su entorno.

Cabe resaltar que el constructivismo y el aprendizaje significativo plantean una mirada totalmente diferente a la que por tradición afecta los procesos cognitivos [9]:

El estudiante selecciona, organiza y transforma la información que recibe de muy diversas fuentes, estableciendo relaciones entre dicha información y sus ideas o conocimientos previos; así, aprender un contenido quiere decir que el estudiante le atribuye un significado, construye una representación mental a través de imágenes o proposiciones verbales o bien elabora una especie de teoría o modelo mental como marco explicativo de dicho conocimiento.

En cada uno de los periodos académicos uno a uno los grupos de manera independiente han ido organizado, y desarrollado, un seminario taller acerca de la influencia de la tecnología y su manejo en el contexto actual en el área de la salud, desde su rol como enfermeros, y estos han sido completamente exitosos, los que han permitido que el estudiante salga de su rol pasivo y del aula de clase, para constituirse en autor propio de su formación de manera autónoma pasando de un rol pasivo a un rol proactivo constituyéndose en líderes en los procesos académicos tras la apropiación de valores y responsabilidades en el contexto educativo, soportados en la teoría constructivista que hace énfasis en posibilitarle al estudiante las herramientas requeridas para dar solución a sus interrogantes, modificando sus concepciones y continuando con su aprendizaje; concebido desde un concepto de dinamismo continuo y participativo del aprehendiente, lo que se evidencia con la implementación de una metodología participativa fuera del contexto del aula, como práctica exitosa dentro de la academia.

El ejercicio académico es fructífero, ya que se aplica el juego de roles, donde el estudiante asume un lugar en un contexto específico que le obliga afrontar retos, suplir necesidades y lograr objetivos que de otras maneras no podrían conseguirse en su rol pasivo dentro de la educación que se imparte con esquemas tradicionales, lo que permite identificar los beneficios que esta praxis genera en el proceso formativo en la educación superior que, se relacionan con [10]:

La promoción de un enfoque de aprendizaje profundo y holístico que requiere que los estudiantes interactúen y colaboren para completar una tarea asignada. El contexto del juego de roles requiere que los estudiantes adopten perspectivas diferentes y piensen reflexivamente sobre la información que representa el grupo.

Lo que no de manera irrefutable son beneficios que se obtienen con la aplicación de este esquema metodológico, obteniendo un aprendizaje significativo, donde el estudiante asume compromisos y posiciones diferentes a sus acostumbradas, además de trabajo en equipo [11] el juego de roles tiene múltiples motivaciones para los estudiantes, entre las que se mencionan: asumir ideas y posiciones distintas a las propias, trabajo en equipo, empoderamiento en la toma de decisiones en el juego, mayor compromiso con la asistencia a clases; ellas se transforman en poderosas razones por las cuales un docente debiera considerar la posibilidad de incorporar a su aula este tipo de metodologías.

En este orden de ideas se consiguió el compromiso, asistencia, y participación del 100% de la población de estudiantes, no solo en el desarrollo de las actividades de tipo extracurricular, sino dentro del aula en cada una de las clases, donde el incentivo de permitir ser otro, o verse desde otro punto de vista logró cautivar el dinamismo que se requiera para la actividad.

Acerca del cuidado del paciente, teniendo en cuenta la labor del enfermero, se tiene que para lograr el bienestar existen teorías sobre el cuidado inherente al ser humano, el bienestar en la mente, el bienestar del cuerpo, hoy por hoy en la sociedad mundial nos encontramos en la era digital y para nadie es un secreto la usabilidad de las tecnologías que se pueden utilizar como recurso de acompañamiento al cuidado humano, dichos recursos apoyan a la labor de la salud.

Solo por mencionar los ya comprobados efectos positivos del uso de las TIC en procesos de aprendizaje y al cuidado del paciente se tienen algunos ejemplos a nivel global, tales como:

- La creación y uso de una plataforma virtual conocida como Nursing Procedure Plataform PoPE, mediante el uso de un simulador se ayudó a los estudiantes de pregrado en enfermería de Portugal a ejecutar procedimientos de bañado, vestido, desvestido, asistencias a caminar, posicionamiento y transferencia de personas que no pueden cuidar de sí mismas [5].
- Personas de mayor edad siendo instruidas en el manejo de dispositivos móviles, esto con el incentivo de poder comunicarse con sus nietos, hijos y demás seres queridos, lo que demuestra que aprender a utilizar las nuevas herramientas tecnológicas no se limita a la edad de la persona y que, con el estímulo correcto, se le puede enseñar habilidades y capacitar a cualquier persona [12]. De lo anterior se destaca la personalización del material didáctico, ya que es fundamental que se construya con base a los requerimientos y condiciones de la población objetivo, así se les facilita el aprendizaje a los estudiantes.
- La correlación que existe entre la tendencia al uso de las TIC y el desempeño en las actividades de aprendizaje de un grupo de estudiantes de ingeniería de fabricación de metales [13], donde a una mayor implementación de las TIC reflejan mejores resultados académicos.

Como los anteriores, existen decenas de ejemplos prueba del gran éxito del uso de la TIC en el aprendizaje y, además, muestra de la transversalidad a diversos temas de la educación: ingenierías, medicina, computación, etc. No obstante, aún queda mucho camino por recorrer antes de globalizar el uso de las TIC, [14] en su exhaustiva revisión bibliográfica sobre las TIC en personas con síndrome de Down encontraron limitaciones, como que la información no es difundida y producida aceleradamente, por lo que los educadores de dicha población ven sesgado el avance en materia de estudio y su propia preparación para la atención al paciente. Aún con el avance tecnológico es necesario que el ser humano realice la tarea de documentar, organizar y publicar los diversos estudios en materia de salud y cuidado al paciente, cosa que se lleva a cabo con la ayuda de las herramientas web y las TIC para la difusión y posterior uso del conocimiento.

5. CONCLUSIONES

El aporte del uso de las TIC en programas de enfermería en la capacitación de los estudiantes es fundamental, ya que la tecnología es imprescindible en el mundo moderno y hace parte de los procesos académicos y administrativos, el buen uso de la tecnología plantea mejoramiento del cuidado del paciente y toma de decisiones oportunas.

El análisis de los resultados logró establecer que se cumplió la meta de manera progresiva y satisfactoria durante el proceso académico, se dio el fomento de los aprendizajes sobre el conocimiento y uso responsable de las TIC para el cuidado básico del paciente.

Se comprobó que la transversalidad del conocimiento una vez más es símbolo de la generación de saberes determinantes dentro de cualquier contexto, donde la apreciación por áreas resulta atípica e intermitente, ya que el conocimiento es transversal y universal es ahí donde se hace énfasis en la importancia de la unión, apoyo, gestión y proyección de las diferentes facultades de manera consolidada en temas asociados al desarrollo cognitivo, donde se proyectó desde la facultad ciencias de la salud la consecución de un proyecto académico basado en el eje central del desarrollo tecnológico cuyo bastión como soporte de una temática coyuntural en el campo de la ciencias de la salud como lo es el cuidado humano cuyos resultados favorecen el la praxis directamente las facultad de ciencia de la salud.

Las estrategias metodológicas y en especial el desarrollo del seminario Taller desarrollados por los mismos estudiantes logró que la interiorización del conocimiento y transferencia de este les permitiera generar competencias como la identificación de las herramientas tecnológicas pertinentes para el uso asociado al cuidado del paciente, y la apropiación de aquellas como la web 3.0 para el desarrollo de estrategias educativas mediadas por tecnología para el cuidado de la salud humana.

REFERENCIAS

- [1] Ley 266 de 1996, El Congreso de Colombia, Por la cual se reglamenta la profesión de enfermería en Colombia y se dictan otras disposiciones, 5 de febrero de 1996, Recuperado: http://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-105002_archivo_pdf.pdf
- [2] M. M. Navarro, *ClinicCloud*, Ventajas y beneficios de la tecnología en la salud, 2016, Recuperado: <https://cliniccloud.com/blog/ventajas-beneficios-de-la-tecnologia-en-la-salud/>
- [3] J. C. Guerrero-Pupo, I. Amell-Muñoz y R. Cañedo-Andalía, "Tecnología, tecnología médica y tecnología de la salud: algunas consideraciones básicas", *ACIMED*, vol. 12, no. 4, p. 1, 2004.
- [4] R. Costa, et al. "Enseñanza de enfermería en tiempos de Covid-19: ¿Cómo reinventarla en este contexto?", *Texto contexto - enferm.* Vol. 29, 2020.
- [5] I. Silva, J. Angelo, F. Santos, M. J. Lumini y T. Martins, "Satisfaction and usability of an information and communications technology in nursing education: A pilot study", *Revista de Enfermagem Referência*, vol. 4, no. 21, pp. 143-150, 2019.
- [6] S. Kim y M. S. Faith, "Cyberbullying and ICT use by immigrant youths: A serial multiple-mediator SEM analysis", *Children and Youth Services Review*, vol. 110, 2020.
- [7] C. Manterola y T. Otzen, "Estudios Experimentales 2 Parte: Estudios Cuasi-Experimentales", *Int. J. Morphol*, vol. 33, no. 1, pp. 382-387, Marzo 2015.
- [8] C. P. Arredondo-González y J. Siles-González, "Tecnología y Humanización de los Cuidados: Una mirada desde la Teoría de las Relaciones Interpersonales", *Index de Enfermería*, vol. 18, no. 1, pp. 32-36, Enero/Marzo 2009.
- [9] F. Díaz-Barriga y G. Hernández-Rojas, "Estrategias Docentes para un aprendizaje significativo: Una interpretación constructivista", 1ª ed, Bogotá: Editorial McGraw-Hill, 1999.
- [10] A. Schaap, "Learning political theory by role playing", *Politics*, vol. 25, no. 1, pp. 46-52, 2005.
- [11] A. Porter, "Role-playing and religion: Using games to educate millennials", *Teaching Theology & Religion*, vol. 11, no. 4, pp. 230-5, Septiembre 2008.
- [12] M. Blok, E. van Ingen, A. H. de Boer y M. Sloodman, "The use of information and communication technologies by older people with cognitive impairments: from barriers to benefits", *Computers in Human Behavior*, vol. 104, pp-1-9, Marzo 2020.
- [13] W. Abbas, D. O. Jermias y K. Syauqi, "The effect of information and communication technology with learning activities towards student performance", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1446, no. 1, pp. 1-6, 2020.
- [14] J. M. Fernández-Batanero, M. Montenegro-Rueda, J. Fernández-Cerero, I. García-Martínez. "Impact of the information and communication technologies on the education of students with down syndrome: A bibliometric study (2008-2018)", *European Journal of Educational Research*, vol. 9, no. 1, pp. 79-89, Enero 2020.

Utilización de las redes neuronales artificiales para el control y estimación de parámetros en accionamientos y sistemas eléctricos

Verena de Jesús Mercado Polo¹
Lizeth Dayane Cortes Hernández²
Alonso de Jesús Retamoso Llamas³
Unidades Tecnológica de Santander
Colombia

Las redes neuronales artificiales son técnicas de control inteligente usadas en diversos campos de la ingeniería eléctrica, en máquinas estáticas y rotativas, en energías renovables y en sistemas eléctricos en general. El objetivo de este trabajo es aplicar las redes neuronales para el control y estimación de parámetros en accionamientos y sistemas eléctricos. Se utilizó la metodología *design thinking* para su aplicación; se inició con el análisis y determinación de los datos de los sistemas para definir la arquitectura y algoritmo de entrenamiento; los resultados se verificaron con el error obtenido para posteriormente verificar su funcionalidad e implementación. Se utilizaron dos aplicaciones: la primera el control de un sistema de riego, y la segunda la estimación de la eficiencia de un panel solar teniendo en cuenta datos de prueba para el entrenamiento. Para ambos casos se usó Matlab para el entrenamiento de la red neuronal, utilizando arquitectura hacia adelante, y para el sistema de riego la red determinada en Matlab se implementó en arduino.

¹ Ingeniera Electricista, Especialista y Magíster en Automatización e Informática Industrial. Profesora de tiempo completo.

Contacto: verenadejesus@correo.uts.edu.co

² Ingeniera Electrónica y Magíster en Ingeniería Electrónica. Profesora de tiempo completo.

Contacto: lizethcortes@correo.uts.edu.co

³ Ingeniero electricista y Magíster en potencia eléctrica.

Contacto: alonsoretamoso@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos pueden ser de muchos tipos teniendo en cuenta la generación, transmisión, distribución y usuarios finales, elementos claves de la cadena productiva eléctrica, en cada uno de ellos hay muchos equipos y sistemas que requieren diagnóstico y control en su funcionamiento. En [1] se indican que los sistemas eléctricos deben cumplir con las normas y esto obliga a tener las condiciones necesarias para desarrollar sus actividades, sin embargo, el sistema de control a utilizar depende en gran medida del uso final que se le dé a la electricidad.

Con el uso de tecnologías para la generación de energías renovables y la incorporación de sistemas digitales para su funcionamiento se requieren técnicas de control que se adapten efectivamente a los sistemas eléctricos y esta situación se inclina al uso de redes inteligentes [2].

Las redes neuronales artificiales RNA pertenecen a las técnicas de control inteligente, en [3] se indica que las RNA son esquemas que emulan el comportamiento de las neuronas biológicas y su uso en los sistemas eléctricos es beneficioso, presentan grandes resultados enfocados a la mayor rapidez para adaptarse y responder a los requerimientos establecidos.

Para mejorar las condiciones de la matriz energética en el mundo se ha incorporado generación de energía eléctrica limpia, entre las que se destacan la eólica y la fotovoltaica, donde el control y diagnóstico son fundamentales, por lo que muchas técnicas de control inteligente se han utilizado con buenos resultados [4]. Para el pronóstico a corto plazo de la demanda eléctrica se utilizaron las RNA y se implementaron con la herramienta computacional Matlab, el entrenamiento de la red neuronal se realizó con base en los registros obtenidos del sistema SCADA conectados a un alimentador primario [5].

Para realizar pronósticos en microrredes, las RNA son herramientas de control y diagnóstico muy usadas comúnmente, porque la generación de energía eléctrica proviene de fuentes renovables y requiere de métodos para su gestión [6]. En una matriz energética se diseñó un modelo híbrido para el pronóstico de energía eólica, incorporando las RNA a un modelo numérico, obteniendo buenos resultados para anticiparse a la generación de energía eléctrica [7]. Las RNA se implementaron para la predicción del potencial de energía eléctrica en un parque fotovoltaico en Cuba, mediante la herramienta computacional Matlab, obteniendo buenos resultados [8].

En las líneas de transmisión de alta tensión se utilizan las RNA para la detección de fallas utilizando la herramienta computacional Matlab, y para la identificación de las fallas se usó el programa Alternative Transient Program ATP, se seleccionó una RNA tipo perceptrón multicapa con dos capas ocultas con 15 y 10 neuronas [9]. Para el análisis de fallas en máquinas estáticas y rotativas se utilizan las RNA para la detección de fallas en el aislamiento de transformadores de potencia a través de descargas parciales [10]. En motores eléctricos para la obtención de condiciones de operación se han diseñado sistemas de detección de fallas usando RNA, en [11] se usó el algoritmo Levenberg-Marquardt para el entrenamiento de RNA utilizando nueve tipos de fallas en motores en régimen transitorio, obteniéndose buenos índices de viabilidad.

Las RNA tienen grandes aplicaciones en sistemas rotativos, tal es el caso del control de posición de un cilindro utilizado en un sistema hidráulico, en el que se usa una electroválvula, como elemento final de control y LABVIEW como sistema de adquisición y control [12]. En accionamientos eléctricos, las RNA se usan como herramientas para el control y regulación de velocidad, en [13] se realizó un estimador de velocidad usando un sensor de corriente, las RNA utilizadas son tipo perceptrón multicapa, la cual fue entrenada a través de la obtención de una curva de funcionamiento de velocidad y par de carga. En [14] se desarrolló un sistema para el pronóstico de la velocidad del viento en generación eólica usando RNA tipo Feedforward Backpropagation mediante el uso de la herramienta computacional Matlab, este sistema se diseñó como herramienta para el proceso de enseñanza-aprendizaje de estudiantes de ingeniería eléctrica.

Muchas han sido las aplicaciones que se han realizado usando las RNA como estrategias de diagnóstico, predicción y control en diferentes sistemas eléctricos como es la estimación de velocidad o de condiciones

de operación en motores eléctricos [15-18]. Para la simulación y entrenamiento de RNA se utiliza frecuentemente el programa computacional Matlab [19-22]. El Arduino es un sistema embebido que por ser económico y de fácil adaptación a diferentes sistemas de control es muy usado para la implementación de RNA, en sistemas domóticos enfocados a la eficiencia energética [23-26].

En este trabajo se caracterizan y se muestran dos aplicaciones, la primera es el control de un sistema de riego y la segunda la estimación de la eficiencia de un panel solar teniendo en cuenta datos de prueba para el entrenamiento. Para ambos casos se usa Matlab para el entrenamiento y determinación de la red neuronal con arquitectura hacia adelante, para el segundo caso se usa arduino para su implementación.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Redes Neuronales Artificiales

Son sistemas que emulan el comportamiento de las redes neuronales biológicas que tienen la capacidad de manejar información de diferentes sistemas [27]. Es considerado un método computacional que permite resolver sistemas complejos con la posibilidad de realizar predicciones de sistemas no lineales [28].

2.2 Elementos de una Red Neurona Artificial

Una red neuronal emula el comportamiento del sistema nervioso biológico y los elementos que las conforman son similares, en la Figura 1 se muestra la equivalencia entre una red neurona biológica y una red neuronal biológica.

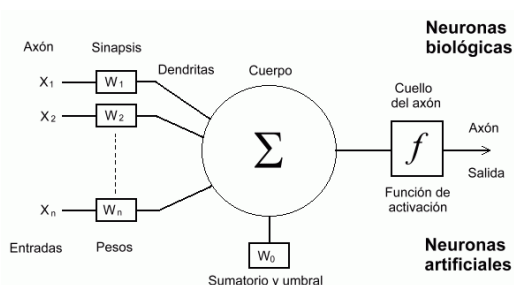


Figura 1. Equivalencias entre elementos de una red neurona biológica y una red neurona artificial [29]

En esta estructura de la RNA y sus diferentes elementos, se observan que los principales elementos son las entradas, salidas y las capas ocultas que corresponden al cuerpo de las neuronas biológicas, como elementos que interconectan estas capas se encuentran los pesos que permiten obtener las ecuaciones matemáticas representativas de cada neurona de la o las capas ocultas y la función de activación encargada de activar las neuronas y determinar el valor de las salidas. En las neuronas se consideran los pesos por las entradas más las bias, que representa el umbral que permite ajustar la representación matemática del modelo de la neurona artificial.

2.3 Tipos de Neuronales Artificiales

Las neuronas artificiales se pueden dividir en neuronas binarias y neuronas reales, las primeras se caracterizan por tomar valores entre $\{0, 1\}$ o $\{-1, 1\}$ y las segundas pueden tener valores dentro del rango $[0, 1]$ o $[-1, 1]$ [29].

2.4 Aprendizaje

El modelo matemático de las RNA se basa en el aprendizaje, que disminuye el proceso de clasificación de patrones. Los datos del sistema definen el comportamiento de la red neuronal con base en su estructura y en los parámetros que se consideran [29]. El aprendizaje puede ser supervisado y no supervisado. El aprendizaje supervisado es controlado y busca que la respuesta de la red sea la que se requiere, este aprendizaje puede ser por corrección de error, por refuerzo y estocástico. En el aprendizaje no supervisado no hay supervisión y no hay control sobre la salida. Se considera que el aprendizaje [30].

2.5 Arquitectura de las RNA

La arquitectura se refiere a la topología del conexionado de la red neuronal. En [31] se indica que dependiendo de los conceptos hay varias arquitecturas, con relación a la conexión de las capas pueden ser monocapa y multicapas, con relación a la dirección del flujo pueden ser unidireccionales (*feedforward*) y recurrentes (*feedback*). En las unidireccionales el flujo es en una sola dirección y en las recurrentes o realimentadas el flujo puede ser en cualquier sentido. En la Figura 2 se muestran las RNA unidireccionales, que se usaran en este trabajo.

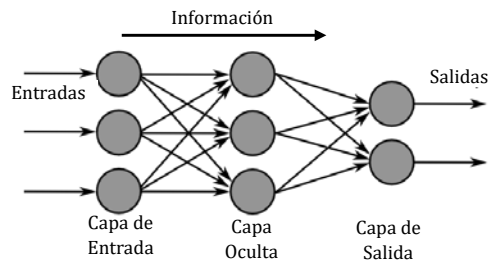


Figura 2. RNA unidireccionales (*feedforward*)

2.6 Entrenamiento

Para que las RNA desarrollen el aprendizaje deben variarse los pesos a través del proceso llamado entrenamiento, en el cual cada neurona debe adaptar los valores de los pesos en función de los requerimientos establecidos [31]. El objetivo primordial del entrenamiento es buscar los pesos de las neuronas que arrojen los resultados requeridos. Para el entrenamiento de las RNA es necesario tener en cuenta que entre más información se tenga, el entrenamiento será mejor y el ajuste de los pesos será el adecuado, esto se realiza usando algoritmos de aprendizaje, los cuales preferiblemente deben realizarse con herramientas computacionales, como el Matlab.

2.7 Técnicas numéricas de entrenamiento

En este trabajo se usa el entrenamiento supervisado mediante el módulo de Matlab Neural Network Toolbox. El algoritmo de entrenamiento más usado y reconocido es el Backpropagation, en el que hay una etapa en que se ingresan unos patrones de entrada y este evoluciona a través de las capas de neuronas hasta proporcionar una salida, se basa en el ajuste de los pesos hasta que la salida de la red coincida con la salida del patrón de referencia [31]. Hay varias técnicas numéricas de entrenamiento entre las que se destaca el algoritmo Levenberg Marquardt, el cual es aplicable a redes neuronales multicapa con una gran cantidad de patrones de entrada [32]. Ambos métodos convergen con el método del error cuadrado medio MSE. En este trabajo se usarán los dos algoritmos de verificar la RNA.

3. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se usa la adaptación de la metodología design thinking, usada para desarrollar trabajos de investigación e implementación en diferentes áreas, en [33] se propone una secuencia de tres pasos como se muestra en la Figura 3.

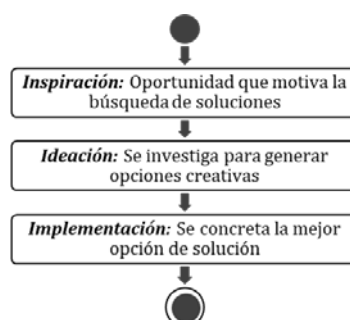


Figura 3. Actividades para la metodología design thinking [33]

En este trabajo se desarrollaron las tres actividades de la metodología *design thinking*, se inicia con la inspiración que proporcionan los sistemas eléctricos, las características y ventajas que tienen las redes neuronales como solución para el diagnóstico y control, la segunda actividad es la ideación, la búsqueda de las herramientas para aplicar y entrenar las redes neuronales con base en datos o información obtenida de su funcionamiento o de experimentación, y la última actividad es la implementación de la red neuronal artificial, en este caso se utiliza Arduino.

Siguiendo los lineamientos de *design thinking* en aras de llevar a cabo el diseño de las redes neuronales se plantean las metodologías que se muestran en las Figuras 4 y 5, donde se observa que se inicia con la base de datos del sistema que ha inspirado a usar las RNA, luego en función de los referentes teóricos se define la arquitectura de las RNA a utilizar y el algoritmo de entrenamiento, si en este punto el entrenamiento de la red es adecuado se valida su funcionalidad y si es para el control se continúa con la implementación, para la estimación de parámetros se llega hasta el punto de verificación del entrenamiento que se muestra en la Figura 4.

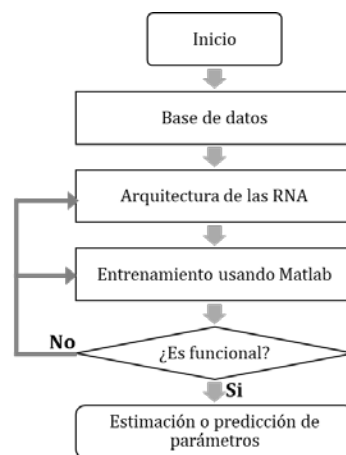


Figura 4. Actividades para el diseño de la RNA

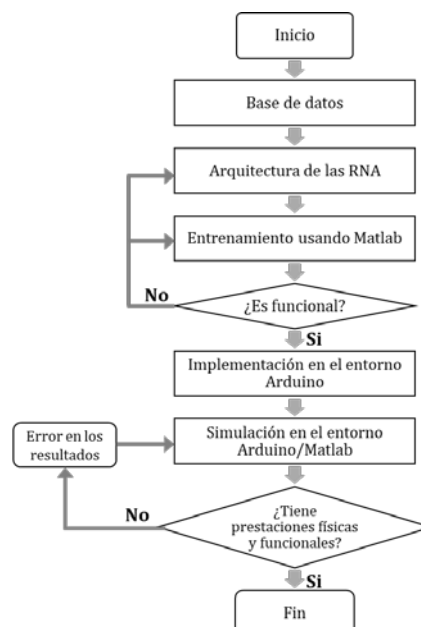


Figura 5. Actividades para el diseño e implementación de la RNA

4. RESULTADOS

Para la aplicación de las RNA se plantean dos casos de análisis, el control del sistema de riego en función de la humedad y parámetros de protección para el motor eléctrico y la estimación de la eficiencia del panel solar de silicio, para el primer caso se usa el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento y para el segundo el algoritmo Levenberg Marquardt.

4.1 Sistema de Riego

En la Figura 6 se muestra el sistema de riego, el cual debe funcionar de forma automática. Para su funcionamiento deberá tenerse en cuenta:

- La bomba se activará cuando la tierra esté seca o normal, pero no se activará cuando la tierra este húmeda. La humedad del suelo se mide con sensores de humedad de tipo analógico, ubicados en 4 sectores del terreno que se va a regar. Se registran valores entre 0 a 100%, y se considera el suelo seco, húmedo y muy húmedo.
- La bomba no puede funcionar en vacío, se activará cuando el depósito de agua esté lleno o tenga un nivel mayor al 20%.
- El motor cuenta con protección contra sobre corriente con un relé de sobrecarga térmico.

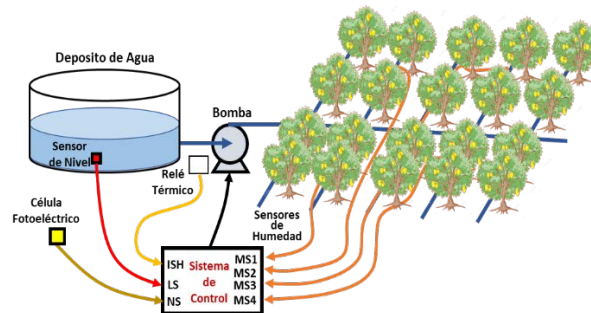


Figura 6. Sistema de Riego

Teniendo en cuenta la metodología propuesta en la Figura 5, la implementación se desarrolla de la siguiente manera:

1. *Base de Datos.* Con base en las condiciones de funcionamiento se obtiene el comportamiento de la activación de la bomba. Se tienen siete (7) entradas y una salida que es la bobina del contactor, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Entradas y salidas

	Descripción	Tipo de Señal
Entradas		
ISH	Relé Térmico de Sobrecarga	Digital {0,1}
LS	Sensor de Nivel	Analógica [0,1]
NS	Célula Fotoeléctrica	Digital {0,1}
MS1	Sensor de Humedad Sector 1	Analógica [0,1]
MS2	Sensor de Humedad Sector 2	Analógica [0,1]
MS3	Sensor de Humedad Sector 3	Analógica [0,1]
MS4	Sensor de Humedad Sector 4	Analógica [0,1]
Salida		
KM1	Bobina del Contactor	Digital {0,1}

- Hay dos entradas digitales y cinco analógicas, para las analógicas se consideran señales del 0 al 100% para la humedad y para el nivel. Para el sensor de nivel se consideran tres condiciones, una cuando el nivel es menor al 20% se considera nivel bajo, cuando está entre 20 y 70% se considera de 0.5 y cuando es mayor a 70% será nivel alto.
- Para la humedad del suelo se recogen los datos de 4 sectores (MS1, MS2, MS3 y MS4). En [34] se indica que generalmente hay dos tipos de sensores de humedad que se usan para la programación del riego, los que miden el volumen de agua que contiene el suelo y los que miden el potencial de agua, este último será el que se considera para la implementación. Para el caso de los sensores de humedad para la RNA se consideran valores mínimos, máximos y promedio, HMIN, HMAX y HPROM, respectivamente. Cuando el % de humedad mínimo sea <30%, la señal MS se considera nivel bajo, cuando el % de humedad esta entre 30 y 70% la señal MS se considera 0.5 y cuando sea mayor a 70%, MS será de 1.

2. *Arquitectura de las RNA*: Se usará la red unidireccional de tres capas, como se muestra en la Figura 7. Donde la matriz de entradas y salidas para el entrenamiento es la que se muestra en la Tabla 2.

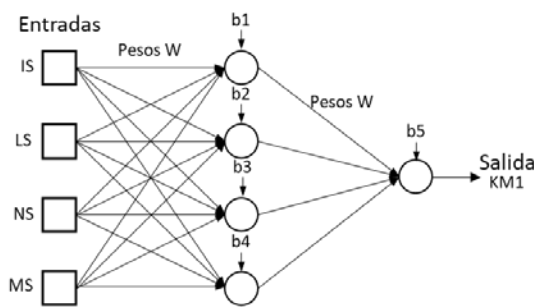


Figura 7. Arquitectura de la RNA

Tabla 2. Matriz de entrenamiento

ISH	LS	NS	MS	KM1
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0
1	1	0	0.5	0
1	1	1	0.5	1
1	0.5	0	0	1
1	0.5	1	0	1
1	0.5	0	0.5	0
1	0.5	0	0.5	1
1	0.5	0	1	0
1	0.5	1	1	0

3. *Entrenamiento*: La RNA se entrena utilizando los resultados del funcionamiento de la bomba, teniendo en cuenta la Tabla 2 y considerando las entradas y salidas que tienen valores de 0, 0.5 y 1. El entrenamiento se realiza usando el algoritmo `traincgf` (Conjugate Gradient Backpropagation), usando la herramienta computacional Matlab:

```
p=[0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1;0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5;0 0 1 1 0 0 1 1
0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1;0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0.5 0.5 0 0 0.5 0.5 1 1];
t=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 0];
net = newff(minmax(p),[4 1],{'tansig','purelin'},'traincgf');
net = init(net);
net.trainParam.epochs=1000;
net.trainParam.goal=1e-9;
net=train(net,p,t);
a = sim(net,p)

pesos1 = net.iw{1,1}
bias1 = net.b{1,1}
pesos2 = net.lw{2,1}
bias2 = net.b{2,1}
```

La función de activación utilizada es la tangente hiperbólica, como se muestra en la ecuación (1).

$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (1)$$

Las entradas y salidas de la red, se representan con p , que es el conjunto de datos de las variables de entrada y t los resultados obtenidos de las condiciones de funcionamiento. Se usa `newff` para crear una red de retropropagación (Backpropagation) y la sintaxis se muestra en la ecuación (2).

$$\text{newff}(\text{PR}, [\text{S1 S2 ... SNI}], \{\text{TF1 TF2 ... TFNI}\}, \text{BTF}, \text{BLF}, \text{PF}) \quad (2)$$

Donde:

PR: Matriz de valores máximos y mínimos de cada uno de las R neuronas de entrada.

Si: Número de neuronas para cada capa.

TFi: Función de transferencia en cada una de las capas, por defecto utiliza `tansig`.

BTF: Algoritmo de entrenamiento, por defecto utiliza `trainlm`.

BLF: Función de actualización de los pesos, por defecto utiliza `learnsgdm`.

PF: Función para evaluar el desempeño de la red, por defecto utiliza `mse`.

Los resultados se expresan como se muestra en la ecuación (3).

$$n = Wp + b \quad (3)$$

Donde:

n = las ecuaciones matemáticas de las neuronas

W = matriz de pesos

p = las entradas

b = vector de bias

Los resultados del entrenamiento se obtuvieron en 525 iteraciones con un error de 1.40×10^{-5} . Para la primera capa oculta se tienen los pesos y bias, que se muestran en las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

$$Wp = \begin{bmatrix} 4.5904 & -0.4373 & 0.1880 & -5.0294 \\ 2.5837 & 4.0542 & 0.3585 & -5.1959 \\ -0.7128 & -1.6924 & -3.2150 & 6.6849 \\ -1.0875 & -1.8957 & -0.7547 & 4.3705 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p1 \\ p2 \\ p3 \\ p4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.5904 & -0.4373 & 0.1880 & -5.0294 \\ 2.5837 & 4.0542 & 0.3585 & -5.1959 \\ -0.7128 & -1.6924 & -3.2150 & 6.6849 \\ -1.0875 & -1.8957 & -0.7547 & 4.3705 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IS \\ LS \\ NS \\ MS \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b = \begin{bmatrix} -1.8671 \\ -3.1970 \\ 0.2715 \\ 0.7094 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para la segunda capa oculta, los resultados se muestran en las ecuaciones (6) y (7).

$$W = [0.4589 \quad 1.1360 \quad -1.1661 \quad 2.2615] \quad (6)$$

$$b = 0.4987 \quad (7)$$

La estructura de la red neuronal es la que se muestra en la Figura 8, donde se observa que hay dos capas ocultas, la primera capa tiene 4 neuronas y la segunda una neurona.

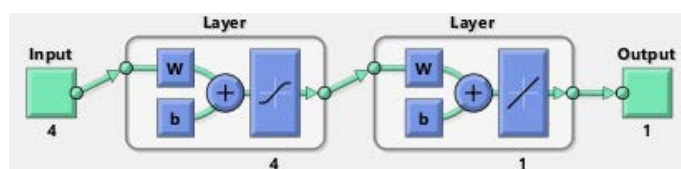


Figura 8. RNA obtenida para el sistema de riego

4. *Implementación en Arduino:* para la implementación se utiliza el Arduino Uno y se tienen en cuenta las señales digitales (IS, NS) y las analógicas (LS, MS1, MS2, MS3 y MS4). En la Figura 9 se muestra la conexión de las entradas y salidas y en la Figura 10 se muestra el circuito de salida, necesario para adecuar o que sirva de enlace la salida del Arduino de 5 V con la bobina del contactor de 120 V.

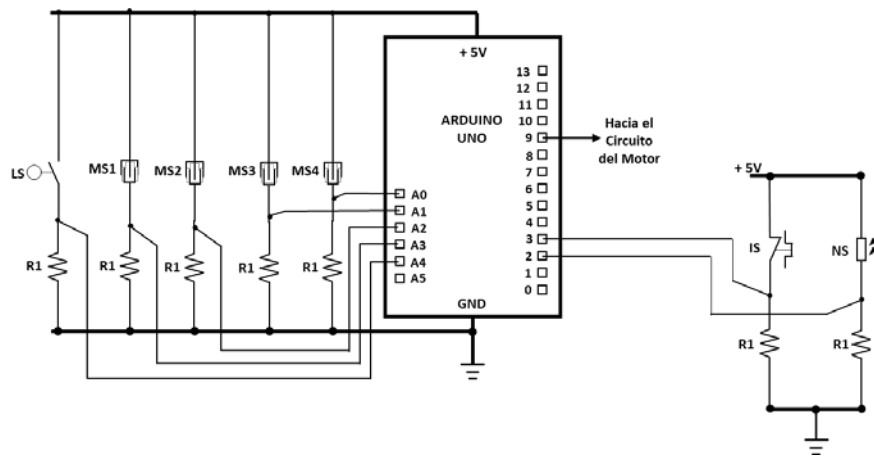


Figura 9. Implementación en Arduino

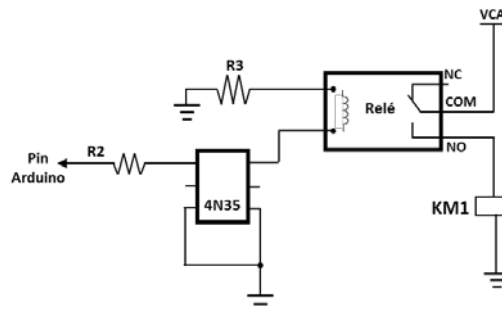


Figura 10. Circuito de salida para la activación de la bobina del contactor KM1

5. *Programación en Arduino:* se usa el Arduino Uno y la programación en el IDE de Arduino, teniendo en cuenta las señales digitales (IS, NS) y las analógicas (LS, MS1, MS2, MS3 y MS4). En la programación se consideran las entradas digitales IS y NS conectadas a los pines 2 y 3, la salida digital en el pin 9 y las entradas analógicas se conectan a los pines A0, A1, A2, A3 y A4. Para la programación de la RNA se utilizan los pesos obtenidos del entrenamiento y la función de activación tangente hiperbólica.

A continuación, se muestra la programación en el IDE de Arduino:

```
#include<math.h>
float p1, p2, p3, p4;
float n1, n2, n3, n4, n5;
float a1, a2, a3, a4;
float e=2.713281828;
float H1,H2,H3,H4,L,Nivel,VL;
float VH1,VH2,VH3,VH4;
float HMAX1,HMAX2,HMAX,HMIN1,HMIN2,HMIN,HPROM;
void setup() {
  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(3,INPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
}
void loop() {
  p1=digitalRead(2);
  p3=digitalRead(3);
  VH1=analogRead(A0);
  VH2=analogRead(A1);
  VH3=analogRead(A2);
  VH4=analogRead(A3);
  VL=analogRead(A4);
```

```

H1=map(VH1,0,1024,0,100);
H2=map(VH2,0,1024,0,100);
H3=map(VH3,0,1024,0,100);
H4=map(VH4,0,1024,0,100);

HMAX1=max(H1,H2);
HMAX2=max(H3,H4);
HMAX=max(HMAX1,HMAX2);

HMIN1=min(H1,H2);
HMIN2=min(H3,H4);
HMIN=min(HMIN1,HMIN2);

HPROM=(H1+H2+H3+H4)/2;

if(HMIN<30){
    p4=0;
}
if(HPROM>=30&&HPROM<=70){
    p4=0.5;
}
if(HMAX>70){
    p4=1;
}

Nivel=map(VL,0,1024,0,100);
if(Nivel<=20){
    p2=0;
}
if(Nivel>20&&Nivel<=80){
    p2=0.5;
}
if(Nivel>80){
    p2=1;
}
n1=p1*(4.5904)+p2*(-0.4373)+p3*(0.1880)+p4*(-5.0294)+(-1.8671);
n2=p1*(2.5837)+p2*(4.0542)+p3*(0.3585)+p4*(-5.1959)+(-3.1970);
n3=p1*(-0.7128)+p2*(-1.6924)+p3*(-0.2150)+p4*(6.6849)+(0.2715);
n4=p1*(-1.0875)+p2*(-1.8957)+p3*(-0.7547)+p4*(4.3705)+(0.7094);

a1=tansig(n1);
a2=tansig(n2);
a3=tansig(n3);
a4=tansig(n4);
n5=a1*(0.4589)+a2*(1.1360)+a3*(-1.1661)+a4*(2.2615)+(0.4987);

if(n5>=0.9){
    n5=1;
    digitalWrite(9,n5);
}
if(n5<0.9){
    n5=0;
    digitalWrite(9,n5);
}
}

float tansig(float x){
    float a;
    a=(pow(e,x)-pow(e,-x))/(pow(e,x)+pow(e,-x));
    return a;
}

```

4.2 Eficiencia de un panel solar de silicio

Se toma como referencia el desarrollo de un sistema de medición de parámetros de un panel solar de silicio realizado en [35], se utilizaron paneles solares de silicio con las siguientes características:

- Potencia máxima pico = 10 W
- Corriente a máxima potencia = 0.54 A
- Voltaje a máxima potencia = 18.36 V
- Corriente de corto circuito = 0.58 A
- Voltaje de circuito abierto = 22 V

El objetivo de la RNA es la estimación de la eficiencia del panel en función de las mediciones de la corriente, voltaje, temperatura e irradiancia. En [36] se indica que para un panel común de silicio se obtienen eficiencias hasta del 16%, por lo que se consideran tres posibles resultados para la eficiencia:

1. Muy baja eficiencia $E_f < 10\%$
2. Baja eficiencia $10\% \leq E_f < 11\%$
3. Eficiencia Media $E_f \geq 11\%$

Teniendo en cuenta la metodología propuesta en la Figura 4, la estimación se desarrolla de la siguiente manera:

1. *Bases de datos:* Al prototipo móvil desarrollado por [35] se le realizaron pruebas de funcionamiento obteniendo los datos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de las pruebas realizadas en el prototipo [35]

Prueba	Irradiancia H_m (W/m ²)	Temperatura (°C)	Voltaje V_{ca} (V)	Corriente I_{cc} (A)	Potencia P (W)	Energía Convertida H_o (W/m ²)	Eficiencia E_f (%)
1	1350	47	20	0,76	15,20	147,28	10,90
2	1140	50	19,50	0,71	13,85	134,15	11,76
3	1080	43	20,30	0,63	12,79	123,92	11,47
4	1100	48	19,67	0,67	13,18	127,70	11,60
6	650	39	20,40	0,40	8,16	79,06	12,16
7	610	32	20,50	0,28	5,74	55,62	9,12
8	620	33	20,60	0,30	6,18	59,88	9,66
9	605	31	20,30	0,26	5,28	51,14	8,45
10	805	38	21,00	0,43	9,10	88,18	10,95

Los parámetros mostrados son la potencia, energía convertida y eficiencia, los cuales se muestran en las ecuaciones (8), (9) y (10), respectivamente.

$$\text{Potencia } P = V_{ca} \cdot I_{cc} \quad (8)$$

$$\text{Energía convertida } H_o = P/A \quad (9)$$

$$\text{Eficiencia } E_f = \frac{H_o}{H_m} * 100 \quad (10)$$

Donde:

P = Potencia del panel en W

V_{ca} = Voltaje de circuito abierto

I_{cc} = Corriente de corto circuito

H_o = Irradiancia calculada

H_m = Irradiancia medida

E_f = Eficiencia en %

A es el área de las celdas y es igual a 0.1032 m²

2. *Arquitectura y Entrenamiento:* Se usa la red hacia adelante y el algoritmo de entrenamiento Levenberg - Marquardt. Para el entrenamiento de la red, se usan las salidas Eficiencia Muy baja (Val_MBE), Eficiencia Baja (Val_BE) y Eficiencia Media (EM), en la Tabla 4 se muestra la matriz para el entrenamiento, donde los se muestra la corriente, voltaje, temperatura e irradiancia, que son los datos medidos del funcionamiento del panel.

Tabla 4. Salidas de la red con los datos de las pruebas

Prueba	Irradiancia <i>H_m</i> (W/m ²)	Temperatura (°C)	Voltaje <i>V_{ca}</i> (V)	Corriente <i>I_{cc}</i> (A)	Eficiencia Muy baja	Eficiencia Baja	Eficiencia Media
1	1350	47	20	0,76	0	1	0
2	1140	50	19,50	0,71	0	0	1
3	1080	43	20,30	0,63	0	0	1
4	1100	48	19,67	0,67	0	0	1
5	825	39	20,60	0,44	0	1	0
6	650	39	20,40	0,40	0	0	1
7	610	32	20,50	0,28	1	0	0
8	620	33	20,60	0,30	1	0	0
9	605	31	20,30	0,26	1	0	0
10	805	38	21,00	0,43	0	1	0

Se usó el algoritmo Levenberg Marquardt con una red supervisada, este algoritmo se implementó en Matlab es el siguiente:

```
Vec_MBE=[610 32 20.50 0.28;620 33 20.60 0.30;605 31 20.30 0.26;];
Vec_BE=[1350 47 20 0.76;825 39 20.60 0.44;805 38 21.00 0.43;];
Vec_EN=[1140 50 19.50 0.71;1080 43 20.30 0.63;1100 48 19.67 0.67;650 39 20.40 0.40;];
```

```
for j=1:3
    T_MBE(:,j)=[1,0,0];
end
for j=1:4
    T_BE(:,j)=[0,1,0];
end
for j=1:3
    T_EF(:,j)=[0,0,1];
end

input=[Vec_MBE' Vec_BE' Vec_EN'];
target=[T_MBE T_BE T_EF];

red=patternnet(4,'trainlm');
red.trainParam.epochs=(1000);
red.trainParam.max_fail=100;
red.trainParam.min_grad=1e-29;
red.trainParam.mu=0.1;
red.trainParam.mu_dec=0.1;
red.trainParam.mu_inc=10;

configure(red,input,target);
red.divideParam.trainRatio=90/100;
red.divideParam.valRatio=5/100;
red.divideParam.testRatio=5/100;
[red,tr]=train(red,input,target);

a = sim(red,input)
pesos1 = red.iw{1,1}
bias1 = red.b{1,1}
pesos2 = red.lw{2,1}
bias2 = red.b{2,1}
```

Los resultados satisfactorios del entrenamiento con el algoritmo Levenberg Marquardt se obtuvieron en 1000 iteraciones con un error de 1.29×10^{-23} . Para la primera capa oculta se tienen los pesos y bias que se muestran en las ecuaciones (11) y (12), respectivamente.

$$W_p = \begin{bmatrix} 2.8153 & -1.4471 & 1.2832 & 2.1786 \\ 5.3981 & -3.0660 & 6.7059 & -3.7076 \\ -4.0368 & -6.9980 & 3.9806 & -2.7871 \\ 1.1707 & 4.2362 & 1.4678 & 3.8200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p1 \\ p2 \\ p3 \\ p4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.8153 & -1.4471 & 1.2832 & 2.1786 \\ 5.3981 & -3.0660 & 6.7059 & -3.7076 \\ -4.0368 & -6.9980 & 3.9806 & -2.7871 \\ 1.1707 & 4.2362 & 1.4678 & 3.8200 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_m \\ T \\ V_{ca} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$b = \begin{bmatrix} -1.6283 \\ -0.2917 \\ 13.3606 \\ 4.2347 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para la segunda capa oculta, los resultados se muestran en las ecuaciones (13) y (14).

$$W = \begin{bmatrix} -0.4270 & 1.3316 & 1.7355 & -13.5386 \\ -4.4764 & 12.9955 & -14.3166 & 13.5650 \\ 4.9019 & -14.2651 & 13.9007 & 0.7828 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$b = \begin{bmatrix} 1.4872 \\ 2.2398 \\ -4.0410 \end{bmatrix} \quad (14)$$

La estructura de la red neuronal se muestra en la Figura 11, presenta dos capas ocultas, la primera tiene 4 neuronas y la segunda capa oculta 3 neuronas.

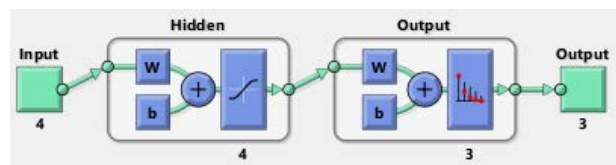


Figura 11. RNA obtenida para la eficiencia del panel solar

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el sistema de control la estructura de la RNA está conformado por dos capas ocultas con cuatro y tres neuronas, respectivamente. Los valores óptimos de los parámetros del entrenamiento se muestran en la Tabla 5, destacando que los resultados se obtuvieron en 525 iteraciones con un error de 1.40×10^{-5} .

Tabla 5. Valores óptimos de los parámetros del entrenamiento Sistema de Riego

Observaciones	24
Iteraciones o épocas	1000
Neuronas ocultas Capa 1	4
Neuronas ocultas Capa 2	3
Error	1.40×10^{-5}
Algoritmo de aprendizaje	traincgf

Los resultados se verifican en función del error y de la comprobación de la salida para cualquier condición. En la Figura 12 se muestra el error cuadrático obtenido, donde se observa que el error tuvo su punto mínimo en 1.40×10^{-5} .

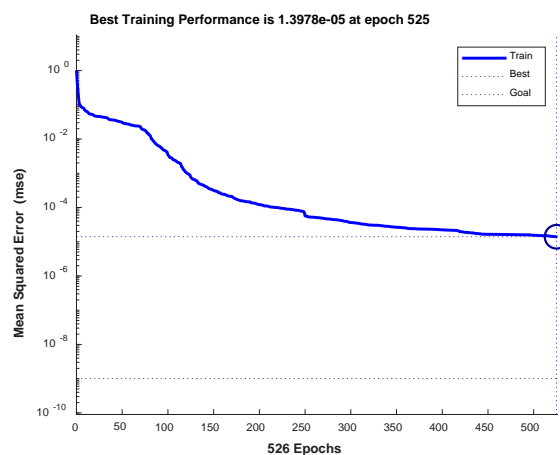


Figura 12. Error cuadrático del entrenamiento de la RNA en el Sistema de Riego

Con la puesta en marcha de la implementación se incorporó un condicional para que la salida tuviese valores de alto y bajo nivel de voltaje, de tal manera que se activará la bobina del contactor que es la que permitirá la activación de la bomba del sistema de riego. Mediante la comprobación del sistema de control usado con la RNA se determinó que el sistema de riego cumple con los requerimientos de funcionamiento.

Para la eficiencia del panel solar de silicio se verifican los resultados en función del error y de la comprobación de la salida para cualquier condición. En la Tabla 6 se muestran los resultados del entrenamiento, donde se observa que el error obtenido fue de $2.44e^{-23}$, el algoritmo de entrenamiento usado para esta RNA es potente y se corroboran lo expresado por los referentes teóricos, el tiempo de entrenamiento para este sistema fue de 11 ms, en la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos del entrenamiento.

Tabla 6. Valores óptimos de los parámetros del entrenamiento de la eficiencia del panel solar

Observaciones	10
Iteraciones o épocas	500
Neuronas ocultas capa 1	4
Neuronas ocultas capa 2	3
Error	$2.44e^{-23}$
Momento	$1e^{-20}$
Algoritmo de aprendizaje	trainlm

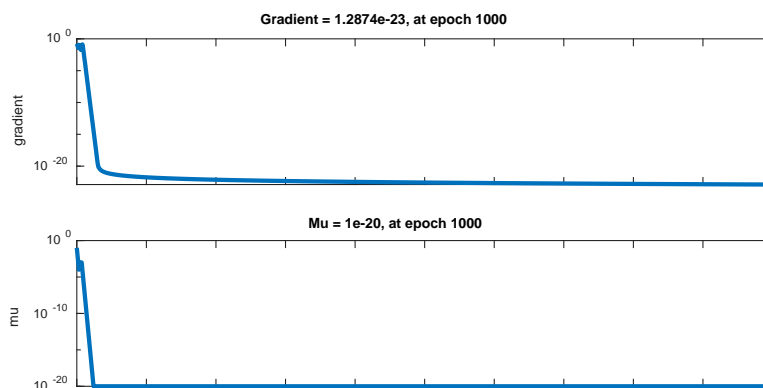


Figura 13. Resultados del error y el momento del entrenamiento eficiencia del panel solar

6. CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta se desarrolló el control del sistema de riego teniendo en cuenta las condiciones de humedad en el terreno, el nivel del depósito, las condiciones de día y noche y la protección por sobrecarga en el motor de la bomba, la RNA está conformado por dos capas ocultas con 4 y 3 neuronas, se entrenó con el algoritmo Backpropagation mediante el toolbox de Matlab, usando 24 observaciones, 525 interacciones o épocas y un error de 1.40×10^{-5} . La implementación se realizó en el Arduino Uno y la programación en el IDE de Arduino, teniendo en cuenta las señales de entrada, los pesos obtenidos del entrenamiento y la función de activación tangente hiperbólica, obteniéndose resultados satisfactorios.

La eficiencia del panel solar de silicio se determinó usando la metodología propuesta, la RNA está conformada por dos capas ocultas con 4 y 3 neuronas, respectivamente. La RNA se entrenó con el algoritmo de entrenamiento Levenberg - Marquardt realizado en la herramienta Matlab, arrojando resultados óptimos con 1000 interacciones y un error de $2.44e^{-23}$.

Con base en los resultados obtenidos se comprobó que la metodología propuesta es efectiva, las RNA determinadas para los dos casos son adecuadas, ya que los resultados concuerdan con los deseados con errores muy bajos. Los algoritmos de entrenamiento utilizados, Backpropagation y Levenberg - Marquardt demuestran gran efectividad para sistemas de control y estimación, con una cantidad considerable de patrones. Es importante resaltar que para el entrenamiento de las RNA entre más patrones se tenga, el entrenamiento será mejor y el ajuste de los pesos será el adecuado.

REFERENCIAS

- [1] C. Gajardo. "La importancia de los sistemas de control en las salas eléctricas," Revista Electro-Industria, Noviembre 2017. Recuperado: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3125&ni=la-importancia-de-los-sistemas-de-control-en-las-salas-electricas>
- [2] J. Ramos, O. Hernández y R. Silverio. "Sistema de supervisión para el monitoreo de redes eléctricas inteligentes," *Energética*, vol. 40, n. 3, pp. 264-272, Diciembre 2019.
- [3] N. Balderramo, Y. Llosas, L. Neves y L. Cuenca. "Diseño de Redes Eléctricas Inteligentes para una Gestión Energética," en la *Novena Conferencia Ibero. de Complejidad, Informática y Cibernética*, 2019, pp. 96-101.
- [4] E. De Almeida, A. Gutiérrez, S. Camargo. "Pronóstico de Energía Eólica para Horizontes Temporales de Corto Plazo en Base a Modelo Numérico de Mesoescala y Redes Neuronales Artificiales," en *Segundo congreso de agua, ambiente y energía de Montevideo*, pp. 1-6, Septiembre 2019.
- [5] J. Carrión. "Implementación de una Red Neuronal Artificial para la predicción de la Demanda Eléctrica a corto plazo," *Energía*, vol. 13, n. 1, 2017, pp. 36-42.
- [6] J. P. Fossati. "Diseño de redes neuronales inteligentes para la realización de pronósticos en microrredes eléctricas," *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, vol. 17, n. 1. 2019, pp. 1-13.
- [7] E. De Almeida. "Pronóstico de energía eólica para horizontes temporales de corto plazo en base a modelo numérico de mesoescala y redes neuronales artificiales," M.S. de Ing. Universidad de la República, Uruguay, 2019.
- [8] Y. Llusá. "Predicción mediante redes neuronales artificiales de la producción de energía de un parque fotovoltaico," *MS Ing.*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba, 2019.
- [9] L. Bautista. "Identificación de 11 tipos de fallas en líneas de transmisión de alta tensión utilizando redes neuronales," Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [10] J. Quiroga y J. Segura. "Análisis de las técnicas neuronales utilizadas en aislantes de transformadores," *Athenea*, vol. 1, n. 2, pp. 12-20, Diciembre 2020.
- [11] L. Murillo, C. Calderón y G. Figueroa. "Detección de faltas en motores eléctricos con base en índices de potencias y redes neuronales," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, n.1, pp. 81-97, Febrero-Marzo 2018.
- [12] R. Cárdena. "Identificación y control digital con redes neuronales para un sistema hidráulico," *Vector*, vol. 12, pp. 32-39, Enero-Diciembre 2017.
- [13] L. Venghi, F. Aguilera, J. Saavedra, P. De la Barrera y C. De Ángelo. "Estimador de velocidad por redes neuronales para una estrategia de control escalar usando un solo sensor de corriente", en *XVIII Reunión de Trabajo en procesamiento de la información y control*, Buenos Aires, Argentina, Septiembre 2019, pp. 549-554.
- [14] D. Pérez. "Predicción de la velocidad del viento para la generación eólica mediante redes neuronales artificiales", Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, Cuba, 2019.
- [15] M. Gallo, J. González, J. Díaz y J. Velazco. "Estimación de la velocidad del motor de inducción utilizando redes neuronales", *Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, n. 29, 2017, pp. 111-117.
- [16] R. Llemss. "Estimación de la carga en servicio de motores asíncronos mediante técnicas de regresión y redes neuronales", M. en Ing. Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2018.
- [17] J. Bossio, G. Bossio y C. De Ángelo. "Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción Utilizando Redes Neuronales Auto-organizadas y Error de Cuantificación", en *XVII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, Buenos Aires, Argentina, Septiembre 2017, pp. 1-6.
- [18] J. Cedeño. "Diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallos en línea para motores eléctricos de inducción basado en la aplicación de técnicas de control inteligente". Editorial Espol. Fiec., Ecuador, 2017.
- [19] I. Zumarraga. "Redes Neuronales en Matlab", Universidad del País Vasco, Bilbao, España, 2019.
- [20] S. Pascual. "Aplicación Matlab para el entrenamiento de redes neuronales para un clasificador de actividad usando datos de una muleta sensorizada", Universidad del País Vasco, Bilbao, España, 2019.
- [21] D. Patiño. "Modelo para el pronóstico de la demanda de la empresa Dipac Manta S.A. (Sede Ibarra) aplicando redes neuronales artificiales", Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2019.
- [22] P. Bolaños, J. Yaulema, O. Gavilánez y B. Ayavaca. "Redes neuronales en la predicción de la velocidad del viento", *Polo del Conocimiento*, vol. 5, n. 5, pp. 4-40, Mayo 2020.
- [23] A. Martínez y F. Gudiño. "Diseño e implementación de reconocimiento facial en un sistema domótico utilizando Arduino y Visual Studio", *Research in Computing Science*, vol. 147, n. 7, pp. 335-346, Marzo 2018.
- [24] A. González, F. Gudiño, E. Méndez y G. Reséndiz. "Integración de técnicas de inteligencia artificial en ambiente domótico," in *Congreso Mexicano de Inteligencia Artificial'*, Comia, 2017.
- [25] D. Sevilla. "Diseño e implementación de un controlador neuronal con Arduino para maximizar la potencia entregada por un módulo Solar fotovoltaico a una carga", Universidad del Magdalena, Colombia, 2017.
- [26] A. Chaux. "Monitoreo de anomalías en máquinas rotativas con agentes inteligentes Jade y Arduino", Institución Universitaria Politécnico Gran Colombiano, Bogotá, Colombia, 2017.
- [27] D. Flores, C. Gómez, D. Cervantes, A. Abaroa, C. Castro, and R. Castañeda. "Prediciendo la Actividad Cardíaca de la Almeja *Tivela stultorum* con Digoxina Utilizando Redes Neuronales Artificiales," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 38, n. 1, pp. 208-216, Abril 2017.

- [28] Grupo de Investigación en Láseres, Espectroscopía Molecular y Química Cuántica Universidad de Murcia, Spain, "Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, para PYME," Junio 2021. Recuperado: <https://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-VI-3/F63s4p3.htm>
- [29] E. Acevedo, A. Serna y E. Serna, "Capítulo 10. Principios y características de las redes neuronales artificiales", en *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Segunda Edición, Medellín, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación: Investigación Científica, 2017.
- [30] K. Delgado, S. Ledesma y H. Rostro, "Análisis de electroencefalograma usando redes neuronales artificiales", *Acta Universitaria*, vol. 19, 2018, pp. 1-24.
- [31] I. Hidalgo, S. Pucuna, B. Hidalgo, D. Hidalgo y N. Latorre. "Estudio comparativo de los algoritmos backpropagation (bp) y múltiple linearregression (mlr) a través del análisis estadístico de datos aplicado a redes neuronales artificialesbackpropagation (bp) and multiple linear regression (mlr) algorithms compar-ative study of the through statistical data analysis applied to artificial neural networks", *Revista Boletín Redipe*, vol. 9, n. 3, pp. 144-152, Marzo 2019.
- [32] R. Osorio, M. Segura y M. Villalba. "Capitulo: Predicción del tráfico de una red inalámbrica basada en Redes neuronales artificiales mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt", en *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Cuarta Edición. Medellín, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación: Investigación Científica, 2019.
- [33] T. Brown and J. Wyatt. "Design Thinking for Social Innovation", *Stanford Social Innovation Review*, Winter 2010
- [34] L. Zotarelli, M. D. Dukes y K. T. Morgan. "Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad", IFAS Extension, University of Florida, 2019.
- [35] N. Flores y M. Domínguez. "Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio. Centro de investigación en materiales avanzados", s. C. Posgrado, México, 2018.
- [36] Delta Volt. "Paneles Solares, Tipos y Eficiencias". Junio 2020, Recuperado: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares>

Optimización del proceso de autorizaciones para servicios de salud a afiliados mediante la automatización de la gestión del correo electrónico

David Leonardo Navas Arenas¹

Yamile Adriana Jaime Arias²

Universidad de La Salle

Colombia

Una Institución Prestadora de Servicios de Salud IPS recibe diariamente un promedio de 800 correos con solicitudes de servicios, así como algunos correos publicitarios, en un buzón de correo denominado autorizaciones. El equipo dedicado a atender el buzón logra dar respuesta a 600 de ellos al día, acumulando el resto para el día siguiente, lo que genera en un tiempo de respuesta promedio de 8 días al paciente, superando en 3 días de demora el tiempo que establece la Resolución 1552 de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, que fija el límite de respuesta a los pacientes en 5 días hábiles para emitir las autorizaciones. La Super Intendencia de Salud vigila esta actividad y los tiempos de atención a los pacientes, por lo que notifica a la IPS de sanciones cuando se presenta demoras. Por su parte, los pacientes al no contar con un tiempo de respuesta ágil recurren a acciones como PQR e incluso a Derechos de Petición, lo que genera un consumo de recursos adicionales en cuanto a personal para su atención. Para facilitar la gestión del buzón y agilizar los tiempos de respuesta a los afiliados se realizó una investigación del proceso de autorizaciones. Se diseñó un algoritmo para su gestión y se construyó un software que implemente un algoritmo con base en métodos de planificación como Round Robin y reglas de clasificación. En cuanto al desarrollo del software, se plantea el uso de macros, incorporados en Microsoft Excel por su fácil comunicación con Microsoft Outlook, donde es posible extraer los mensajes de la bandeja de entrada y gestionarlos sin inconvenientes, empezando por eliminar los correos *spam*, para luego distribuir los correos a los autorizadores y clasificarlos de acuerdo con el tipo de procedimiento a autorizar a partir del asunto y el cuerpo del mensaje. Con lo cual se logra automatizar una tarea repetitiva, responder en el tiempo previsto a los afiliados y mejorar la gestión del equipo de autorizaciones y la calidad del servicio, entre otras ventajas.

¹ Ingeniero Industrial con experiencia en sistemas de gestión en IPS

Contacto: dnavas59@unisalle.edu.co

² Ingeniera de Sistemas y Computación, Magíster en Sistemas y Computación con énfasis en minería de datos.

Contacto: yajaime@unisalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En las organizaciones el tiempo es un recurso limitado, así como costoso. A su vez, las tareas mecánicas han requerido siempre de considerables recursos humanos y técnicos para garantizar un trabajo preciso y coordinado. Sin embargo, en las empresas desarrollar actividades repetitivas y de alto volumen está sujeto a errores evitables si se estudian los procesos y se automatizan las tareas pertinentes, lo cual permite liberar recursos y solucionar cuellos de botella ofreciendo considerables mejoras para el bienestar de las personas. El desarrollo de esta investigación se enfoca en proporcionar una solución automatizada para el manejo de solicitudes de autorización de servicios para atenciones en salud de los afiliados a una Institución Prestadora de Salud IPS, que se entiende como *Instituciones Prestadores de Servicios de Salud: Red de (Hospitales, Clínicas, laboratorios, etc.) se encargan de la prestación del servicio directo a los usuarios del sistema. Son contratadas por las EPS-S y EPS-C [1]*, y opera en el área metropolitana de la ciudad de Bogotá, Colombia.

Los servicios de salud de las IPS se prestan mediante una red de atención. Los afiliados acceden al servicio de salud en centros especializados para la atención mediante diferentes procedimientos, los cuales para ser prestados deben ser previamente autorizados mediante una autorización de servicios que es toda aquella emisión de órdenes para ciertas erogaciones relacionadas con la atención de los programas de salud que administra una institución, y que permiten acceder a una práctica médica, un estudio o cualquier otro servicio complementario que, de una u otra forma, necesite autorización previa para su ejecución [2].

El proceso inicia con una cita médica, o consulta de salud donde se genera una o varias órdenes para procedimientos cuando el médico tratante lo considera necesario. Si el procedimiento no se encuentra en el catálogo de servicios de la IPS, el paciente debe gestionar la orden por correo electrónico. El paciente escanea o fotografía la orden y la envía al correo de autorizaciones de la IPS indicando sus datos personales de contacto como celular, correo electrónico, número de documento y el nombre completo, con el asunto del procedimiento que solicita autorizar. La IPS tiene máximo cinco días calendario para dar respuesta a la solicitud, de lo contrario, incurrirá en multas y sanciones dispuestas por la Superintendencia Nacional de Salud, Super Salud.

La IPS donde se desarrolla esta investigación, dispone actualmente del equipo integrado por 10 gestores integrales distribuidos en turnos de seis horas y cuatro de ocho horas, con un total de 68 horas/hombre por día, en seis días hábiles por semana. Estos funcionarios cuentan con amplio conocimiento del área de autorizaciones y se encargan de dar respuesta a las solicitudes, generando las autorizaciones correspondientes para procedimientos. En este equipo, los gestores disponibles se dividen en dos grupos, cinco gestores en la mañana y cuatro en la tarde y uno más, del turno de la mañana que realiza un filtro de las solicitudes que se reciben diariamente y las distribuye en una red de carpetas donde hay una asignada a cada gestor. Una vez el gestor ha filtrado los correos de acuerdo con su procedimiento, distribuye las solicitudes en las carpetas asignadas en el buzón a cada gestor, en ellas se encuentran subcarpetas por procedimientos. Conjuntamente, cuando las solicitudes se acumulan en más de un día, se crean subcarpetas con la fecha de cada día pendiente para darle prioridad a las solicitudes más antiguas.

Diariamente la IPS recibe en promedio 800 correos con solicitudes de autorizaciones válidas para la IPS con base en procedimientos a autorizar. Por otra parte, también se reciben solicitudes que no realiza la IPS pero que deben responderse indicándole al afiliado dónde se realizan dichas solicitudes, como por ejemplo solicitudes de medicamentos que deben ser tramitadas directamente ante la EPS, para estos casos, se da respuesta y direccionamiento a los afiliados. A su vez, también se recibe publicidad *spam* y anuncios de Office y sus aplicaciones que se deben eliminar, en promedio llegan 80 correos de este tipo al día. Por lo general, cuando se realiza el filtro a los correos, el tiempo de respuesta suele ser de dos días, sin embargo, existen muchos reprocesos que afectan el tiempo de respuesta, ya que sin los filtros se responden correos sin relevancia o duplicados.

De acuerdo con el parágrafo 1, del artículo 1, de la resolución 1552 de 2013 expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social, las IPS deben dar respuesta al afiliado en un máximo de cinco días calendario. A su vez, la Super Salud es la entidad responsable de vigilar este comportamiento y notificar a las IPS cuando

incumplan a la norma. En promedio, el equipo de gestores autoriza 600 correos diarios, por lo tanto, se acumulan correos diariamente, llegando a presentar una demora de hasta tres días en dar respuesta al afiliado, en un proceso que teóricamente debería tardar a lo sumo dos días, incumpliendo la resolución 1552 lo que aumenta las Peticiones Quejas y Reclamos PQR, y coloca en riesgo de sanción a la IPS por parte de la Super Salud, y que puede ocasionar riesgos a la salud de los afiliados, por lo que ellos, en ocasiones, recurren a radicar derechos de petición [3]. Por su parte, el equipo de colaboradores recibe tantas solicitudes que han desbordado sus capacidades.

Entre las alternativas para minimizar las demoras en la gestión de autorizaciones a los afiliados se estudió la posibilidad de emplear otro funcionario, lo que aumentaría los costos del área y no brinda una solución a largo plazo, dado que en el momento que aumenten las solicitudes se volverá a la misma situación.

Por otra parte, la IPS informó que en agosto del año 2019 se presentaron diferentes propuestas de empresas de software para desarrollar aplicativos que gestionaran las autorizaciones desde una página web externa, de esta manera no se utilizaría el buzón del correo electrónico y en su lugar harían uso de un hosting externo. El costo del soporte y el derecho de uso estaba condicionado a la cantidad de autorizaciones recibidas en el mes, debido al volumen que se registraba mensualmente el costo era muy alto, por lo que se rechazaron las propuestas, lo que inició esta investigación.

Como resultado se optó por automatizar la gestión del buzón, con la hipótesis de que con ello se daría respuesta a los usuarios de manera más pronta. Por lo tanto, en esta investigación se decide utilizar técnicas y herramientas de ingeniería industrial para estudiar y analizar el comportamiento de las solicitudes de servicios de salud, luego de lo cual se propone y desarrolla un algoritmo capaz de identificar, clasificar y asignar las solicitudes de atención recibidas en el buzón de correo electrónico para diferentes procedimientos, liberando tiempo de los gestores para procesar las solicitudes de autorización de servicios de salud.

Como resultado se probó la hipótesis aportando valor para la compañía, mejorando la gestión del proceso de autorizaciones de servicios de salud, garantizando un porcentaje mínimo de errores y mejora notablemente la calidad del servicio gracias a la reducción en el tiempo de espera en la cola de solicitudes para los afiliados.

2. MARCO DE REFERENCIA

La gestión de correos electrónicos masivos se ha desarrollado gracias a la investigación de técnicas y modelos de minería de datos, aplicando los métodos de predicción de correos *spam* que se pueden utilizar en esta investigación, favoreciendo la capacidad de análisis en el filtro de correos irrelevantes que evalúan el contenido de los mensajes para descartar aquellos correos irrelevantes.

En este sentido, la investigación [4] propone un modelo para combatir los correos *spam*, que actualmente son identificados con métodos de minería de datos y aprendizaje automático. El modelo indica que los *spammers* se adaptan a las herramientas *anti-spam*, reformando sus características para componer correos no deseados. Por lo que se propone hacer uso de técnicas como Concept Drift, modelo de análisis predictivo, y modelos de minería de datos y aprendizaje de máquina [5], con lo que desarrolla un modelo llamado Ensemble based Lifelong Classification using Adjustable Dataset Partitioning el cual compara con otros algoritmos de análisis de minería de flujo y supera sus métricas de evaluación, obteniendo la mejor precisión y confianza en los resultados.

Sin embargo, la evaluación del modelo indica que este no se evalúa en un ambiente virtual donde cambien los valores de las clases, por lo que lo establece como trabajo futuro, para evaluar el método en sitios web de *phishing*.

Por su parte [6], en su estudio comparan diferentes modelos de aprendizaje supervisado para clasificar los correos electrónicos en irrelevantes y legítimos. Los autores, compilaron un conjunto de correos *spam* y legítimos preliminarmente etiquetado y lo analizaron con un modelo de frecuencias de caracteres, para

previamente utilizar la técnica Word2Vect [7], para expresar cada palabra como un vector, de esta manera agruparon las características por su proximidad vectorial. El modelo procesó las características con diferentes técnicas de minería de datos, como árboles de decisión, Neive Bayes, clasificadores discriminativos, entre otros, de los cuales las mejores clasificaciones fueron desarrolladas por los clasificadores discriminativos. También se concluyó que el análisis de características da resultados similares al análisis de palabras. Con base a los resultados, se considera la técnica de clasificadores discriminativos como un modelo funcional que se puede implementar en trabajos futuros al proyecto, de esta manera la clasificación no depende solo de palabras sino de los caracteres incluidos en el cuerpo del mensaje.

A su vez [8] enfoca el análisis de correos electrónicos no deseados utilizando un enfoque diferente para examinar el contenido de los mensajes. Los autores emplean la ontología de *WordNet*, base de datos que agrupa palabras en conjuntos de sinónimos, y aplican diferentes métodos de semántica y medidas de similitud para interpretar los mensajes y clasificarlos acorde su contenido. El modelo propone clasificar los correos en dos clases: *spam* y *ham*, utilizando un modelo de reducción de características, en tres fases:

1. La primera realiza un preprocesamiento que extrae palabras relevantes del cuerpo y el asunto del mensaje, las evalúa en la base de sinónimos de *WordNet*, extrayendo sinónimos de cada término, buscando relaciones y similitud semántica.
2. La segunda fase, al encontrar similitud entre los sinónimos los agrupa acorde su significado, reduciendo así el contenido del mensaje para seleccionar las características más relevantes, utilizando la técnica *Principal Component Analysis PCA* y *Correlation Feature Selection CFS*.
3. En la tercera fase se comparan las características con bases de datos de mensajes *spam* y se utilizan diferentes técnicas de minería de datos para concluir en la clasificación del correo.

Con este modelo encontraron que clasificadores como *Random Forest* y *RBF Network* alcanzaron una precisión superior al 90%. Como trabajo futuro esperan estudiar el comportamiento del modelo en diferentes bases de datos. El modelo desarrollado, provee una perspectiva diferente al proyecto, que antes no tomaba en cuenta, al comparar no solo palabras clave, sino también sus sinónimos, esperando interpretar el significado y propósito del correo, con ello es posible tener una precisión adecuada en la clasificación de los correos.

De manera similar [9] en su investigación estudian las características lingüísticas de los correos, analizando la frecuencia de pronombres en primera persona para detectar correos de fraude y engaño. Los autores citan la investigación [10] donde establece que el 30% de los correos fraudulentos siguen la siguiente estructura: contienen un saludo inicial, credenciales personales o profesionales, una oferta o historia con declaración de urgencia, una declaración de confianza, datos de contacto y un saludo final muy cortés. El mensaje, indica [10], está desarrollado con el objetivo de dar credibilidad, intimidad y confianza, disipando las dudas de las personas, ocasionando que la persona se ponga en contacto con el estafador.

Los autores realizaron dos análisis, en el primero se concentraron en los pronombres contenidos en los mensajes, las palabras con uso singular (*I, I'd, I'll, me, mine, my, myself*) y plural (*We, we'll, we've, us, our, ours, ourselves*) y la proporción de palabras en singular usando la función de búsqueda de Microsoft Word. El segundo análisis fue realizado con el software DICTION. programa para análisis de texto, en el cual buscaban palabras claves relacionadas a la lingüística del engaño, evaluando el tono verbal y la indexación del hablante. Tras el análisis, identificaron que los correos fraudulentos contienen una proporción singular del 63,1% en comparación con correos no fraudulentos, cuya proporción singular fue del 17,5%.

Con base a ello proponen establecer una agenda en el futuro para analizar los correos mediante modelos heurísticos que permitan dar una mejor clasificación, identificando los puntos en que inician los pronombres singulares. En español, los pronombres personales (yo, mi, mío, yo mismo, conmigo) serían clave para identificar y eliminar correos fraudulentos que ingresen al buzón de autorizaciones. Esta investigación da una orientación al proyecto para el análisis de correos irrelevantes, dado que es posible trabajar la misma técnica para identificar no solo correos *spam* de publicidad, estudiados en las otras investigaciones, sino identificar correos fraudulentos.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Teoría de Colas

A pesar de que el equipo de autorizaciones dispone de 10 gestores para tramitar las autorizaciones de los afiliados, hace uso de 9, debido a que uno de ellos realiza los filtros y clasificaciones, así como la asignación de correos a sus compañeros, sin embargo, a priori no se conoce si una vez automatizada la gestión de solicitudes, el equipo de gestores sea suficiente para dar respuesta en el tiempo adecuado a los usuarios del sistema. Por lo que mediante la aplicación de la teoría de colas se busca establecer el número óptimo de colaboradores en este equipo.

La teoría de colas es el estudio de la espera en diferentes modalidades, que representan los tipos de sistemas que involucran colas de algún tipo [11]. La espera, hace parte de la vida diaria y se manifiesta en los sistemas de diferentes maneras. Como ejemplo, desde que despertamos, esperamos a que la comida esté lista, a que el auto encienda o que pase el autobús para llegar al trabajo o ir a estudiar. La espera sucede con todo lo que interactuamos en nuestro día a día.

Mediante estudios realizados por Erlang [12] sobre los tiempos de espera de las líneas de telecomunicaciones, se desarrolló un nuevo punto de vista para los gerentes, permitiendo tomar mejores decisiones. Erlang es considerado un pionero en la teoría de colas, con sus estudios publicados a partir de 1909 se inició un desarrollo histórico importante para el análisis de los procesos estocásticos [11] y la teoría de la probabilidad [13]. Desde entonces los modelos que se utilizan para las líneas de espera son útiles para determinar la manera en que opera un sistema de colas de la manera más eficaz, debido a que una capacidad enorme representaría costos adicionales, pero sin suficiente capacidad, la espera sería excesiva, por ello, estos modelos permiten encontrar un equilibrio entre el costo del servicio y la espera [11].

Los modelos de colas tienen elementos básicos que describen el comportamiento del sistema [14]. define a los principales elementos como el cliente y el servidor, en el cual, el cliente llega a una instalación desde una fuente, para ser atendido de manera inmediata o esperar en fila en caso de que la instalación este ocupada. La instalación puede contar con uno o más servidores para atender al cliente, quienes, al completar un servicio, halan de forma automática a un cliente que está esperando en cola, si lo hay, en caso de estar vacía, la instalación se vuelve ociosa hasta la llegada de un nuevo cliente [14].

A partir de los elementos principales, [14] analiza otros aspectos como el tiempo entre llegadas de los clientes y el tiempo de servicio por cliente, que por lo general son probabilísticos o determinísticos. El tamaño de la cola o de la fila, puede llegar a ser finito, como el área intermedia entre dos máquinas sucesivas, o, infinita, como las instalaciones de los pedidos por correo. En ese orden, la disciplina de la cola representa el orden en que son atendidos los clientes, siendo la más común la de primero en llegar, primero en ser atendido, pero también puede llegar a darse la de último en llegar, primero en ser atendido, o la de servicio en orden aleatorio. La fuente de la cual se generan los clientes puede ser finita o infinita. En la fuente finita se limitan la cantidad de clientes que van a llegar, por ejemplo, las máquinas que solicitan servicios de mantenimiento. En su lugar, las fuentes infinitas no limitan la cantidad de clientes, por ejemplo, las llamadas que recibe un conmutador telefónico. Para fines más prácticos, se analizan los sistemas con un tamaño de cola y una fuente infinita [14].

Una forma de distinguir un sistema de colas es usando la notación de Kendall-Lee, la cual resulta muy adecuada para describir las características de las colas en paralelo. Menciona [15] que la mejor manera de clasificar un sistema de colas es con la notación de Kendall, desarrollada por Kendall en 1953, utilizando la notación $A/B/s$ para indicar la distribución del tiempo de llegadas, servicio y la cantidad de servidores. Posteriormente, en 1966 [13] añade tres nuevos símbolos. La notación habitual para designar un sistema de colas es la siguiente: $A/B/s/K/H/Z$. Los símbolos que representan la notación se describen de la siguiente forma:

A = distribución del tiempo entre llegadas

B = distribución del tiempo de servicio (o salidas)

s = número de servidores en paralelo (1, 2, ... ∞)
 K = capacidad de la cola (longitud máxima de la fila, 1,2, ... ∞)
 H = tamaño de la fuente o de la población potencial (1, 2, ... ∞)
 Z = disciplina de la cola

Algunos autores prefieren la nomenclatura $(a/b/c):(d/e/f)$, donde d es la disciplina de la cola, e la capacidad de la cola y f el tamaño de la fuente. Abad [15] indica las siguientes abreviaturas que pueden usarse para las distribuciones del tiempo entre llegadas A y el tiempo de servicio B :

M = Markoviano (Exponencial)
 D = Determinística
 Ek = Erlang con segundo parámetro k
 U = Uniforme
 G = Gamma
 G = Distribución genérica

Para indicar las diferentes disciplinas de la cola Z se pueden usar las siguientes abreviaturas:

FIFO = First In, First Out
 LIFO = Last In, First Out
 RSS = Random
 PR = Disciplina con prioridades
 GD = Disciplina genérica

Cuando se omite su valor, por defecto es FIFO [14]. Por ejemplo, la notación $M/D/4/\infty/\infty/FIFO$ establece que el sistema tiene un tiempo entre llegadas Markoviano [16], es decir, de carácter exponencial, un tiempo de servicio determinístico (tiene el mismo tiempo de servicio para todos los clientes), tiene 4 servidores en la instalación que atienden los clientes, no hay límite para el tamaño de la cola, supone que la población es demasiado grande o infinita y atiende a los clientes acorde su orden de llegada. Dado que los últimos valores están por defecto, puede abreviarse la notación de la forma $M/D/4$.

Como se indica, los tiempos de llegada y servicio, pueden seguir una función de distribución de probabilidad. La distribución más común que se suele utilizar es la distribución exponencial. Al suponer que la distribución de probabilidad ocurra un número determinado de veces, implica que tiene un número de ocurrencias en un tiempo determinado, de manera que se dice que el proceso sigue una distribución Poisson [17]. La siguiente terminología para un estado estable, relacionando las variables que ingresan al sistema de colas y los resultados la establecen en [11] :

Estado del sistema = número de clientes en el sistema
 Longitud de la cola = número de clientes que esperan el servicio
 λ_n = tasa media de llegadas o de arribos (clientes que ingresan al sistema por unidad de tiempo)
 μ_n = tasa media de servicio en todo el sistema (clientes que completan su servicio por unidad de tiempo)
 P_n = probabilidad de que haya n clientes en el sistema
 L = número de clientes esperado en el sistema = $\sum_{n=0}^{\infty} nP_n$
 L_q = número de clientes en cola = $\sum_{n=0}^{\infty} (n - s)P_n$
 W = tiempo de espera de un cliente en el sistema
 W_q = tiempo de espera de un cliente en la cola

La terminología nos indica las medidas de desempeño que se analizan en un sistema de colas. Con las tasas media de llegadas y de servicio es posible hallar el tiempo de cada servicio o llegada. Al ser λ_n los clientes que ingresan por unidad de tiempo, tenemos en la ecuación (1) de tiempo entre arribos. Asimismo, μ_n indica el tiempo de servicio en la ecuación (2).

$$\frac{1}{\lambda_n} = \frac{\text{tiempo entre arribos}}{\text{clientes}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu_n} = \frac{\text{tiempo de servicio}}{\text{clientes}} \quad (2)$$

Usando la ecuación (3), en [11] mencionan las relaciones que se demuestran en un proceso de colas estable, sustituyendo los valores de n por λ , la tasa promedio de llegadas.

$$\text{Ley de Little } L = IW \quad (3)$$

Suponiendo que el tiempo medio de servicio sea una constante $1/m$, para más de un cliente se tiene en la ecuación (4) de tiempo de espera de un cliente en el sistema.

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

De esta manera es posible determinar las cantidades fundamentales de un sistema de colas, L , W , Lq y Wq [11]. Los modelos de teoría de colas suponen que los sistemas pasan por un proceso de *nacimiento y muerte*, refiriéndose el término nacimiento a la llegada de un nuevo cliente y el término muerte a la salida del cliente que ha completado su servicio [11].

Dentro de los modelos de nacimiento y muerte, buscando un modelo que represente la situación actual del proceso de autorizaciones de la IPS, se identifica el modelo $M/M/s$, que como ya se ha establecido en la notación de Kendall-Lee, indica que todos los tiempos entre llegadas siguen una distribución exponencial, así mismo los tiempos de servicio y que se tiene un número s de servidores idénticos a nivel tecnológico. Con base a ello, es posible establecer la cantidad necesaria de servidores, para hallar un equilibrio entre el costo de los servidores y el tiempo de respuesta a los afiliados, que cumpla con la Resolución 1552 de 2013.

3.2 Técnica Round Robin o turno rotatorio

Aún con un número adecuado de servidores, la gestión del buzón de solicitud de autorizaciones es realizada por el aplicativo, encargándose de la distribución de los correos a los gestores integrales y de clasificarlos acorde al tipo de procedimiento. Para que el aplicativo realice dichas acciones, se plantea el desarrollo de un algoritmo. Para la distribución de los correos a las carpetas de cada gestor se establece el uso del método de planificación Round Robin.

Round Robin es conocido como una técnica de turno rotatorio que emplea una cola circular, asignando en orden cada proceso para que ejecute la tarea en una cierta cantidad de tiempo y regrese a la cola, a menos que se bloquee [18]. En este sentido, cada carpeta con el nombre de cada gestor es un *proceso*, los correos se asignan a cada carpeta para que realice una *tarea*, la cual para este caso sería almacenar los correos. Cuando los almacena, la carpeta regresa a la cola para volver a recibir otro correo. A medida que se asigna un correo a una carpeta, se selecciona la siguiente carpeta en cola. En programación, se le asigna un tiempo a cada proceso para que realice la tarea y, cuando no es suficiente, se interrumpe el proceso y se ubica al final de la cola de procesos listos, para que continúe cuando vuelva a tener su turno [19].

3.3 Lenguaje de Programación del aplicativo

Para el desarrollo del aplicativo se establece el uso del lenguaje de programación Microsoft Visual Basic for Applications VBA, integrado en el aplicativo de Microsoft Excel, el desarrollo del aplicativo en este lenguaje permite la gestión del buzón en el aplicativo de Microsoft Outlook. VBA es un lenguaje de programación basado en Visual Basic, el cual es un lenguaje de programación orientado a objetos, que tiene su origen en las herramientas de desarrollo de los años 60's, 70's y 80's, como Basic y QuickBasic, los cuales eran lenguajes de programación lógicos y prácticos [20]. En la programación orientada a objetos OPP, un objeto es cualquier cosa que pueda tocar o usar, por ejemplo, en el entorno de Windows, un objeto puede ser una casilla de verificación, un cuadro de lista o botones [21].

Microsoft Excel utilizaba antes macros XLM hasta 1993, reemplazando su lenguaje por VBA, que permite la compatibilidad de las macros en las diferentes versiones, aun cuando se está trabajando con JavaScript como una alternativa a VBA [22]. Una macro es una sentencia de instrucciones que permite automatizar algunos procedimientos de Excel, haciendo trabajos más eficientes y en menor cantidad de tiempo que de

manera manual [23]. Haciendo uso de las macros y su facilidad para ejecutar instrucciones en conjunto, se plantea desarrollar el aplicativo, programando el algoritmo *Round Robiny* las reglas que gestionen el buzón en Microsoft Outlook. Indica [23], que para ejecutar las macros haciendo uso del aplicativo Microsoft Outlook, se debe establecer la referencia a los objetos de esa aplicación. Las librerías de Microsoft Outlook permiten la ejecución de las macros sin inconveniente revisando la versión instalada del aplicativo. Con la librería se pueden declarar las variables OLApp y OLMail. OLApp es una variable de objeto que permite mostrar la aplicación Microsoft Outlook, OLMail es la variable de objeto que contiene los elementos de un correo electrónico (remitente, destinatario, asunto, ...).

4. MÉTODO

El equipo de autorizaciones recibe solicitudes para atención de servicio se salud, historias clínicas y consultas de resultados de laboratorio. El asesor que realiza la autorización verifica el documento del paciente, la vigencia de la orden médica, que los códigos correspondan al diagnóstico y la imagen sea legible. Para el análisis del proceso se tomaron 411 correos gestionados y 40 correos irrelevantes, se analizaron los tiempos de respuesta y los tiempos de solicitud de las autorizaciones, así como las palabras que contenían.

4.1 Desarrollo del modelo de colas

La investigación esperaba usar un modelo de colas *M/M/s* para identificar la cantidad de autorizadores necesarios para procesar las autorizaciones en el tiempo establecido por la resolución 1552 de 2013. Sin embargo, al analizar los tiempos entre arribos y el tiempo de servicio se evidenció que siguen una distribución general independiente. Haciendo uso del software Expertfit de Flexsim®, se evaluó el tiempo entre arribos y el tiempo de servicio, obteniendo mediante la técnica de bondad de ajuste las distribuciones Beta para los arribos y Log-Logistic para el tiempo de servicio. En la Figura 1 se indican los parámetros de cada distribución.

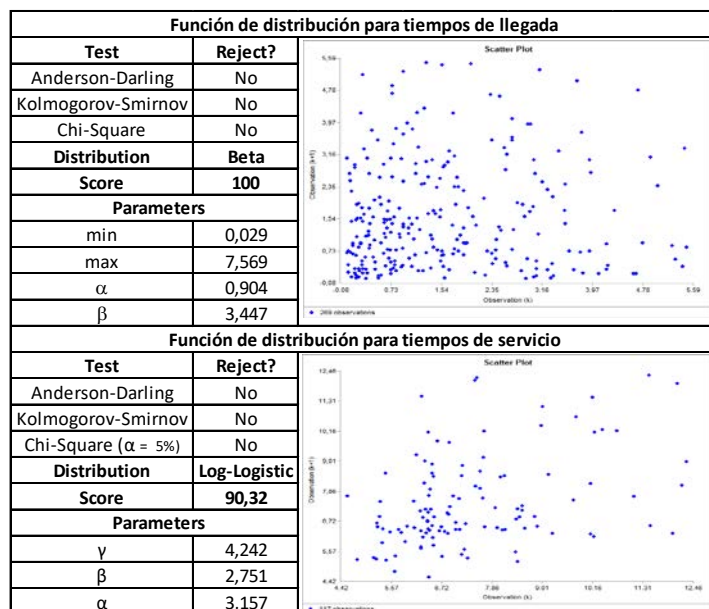


Figura 1. Funciones de distribución para tiempos de llegada y servicio. A la derecha, gráfica de independencia, a la izquierda, resumen de las distribuciones de probabilidad y los parámetros hallados por bondad de ajuste

Como resultado del análisis de los tiempos entre arribos o llegada de cada correo, se evidencia que sigue una distribución Beta general, por otro lado, los tiempos de servicio se ajustan a una distribución Log Logística extendida, indicando un parámetro de ubicación. En la guía de usuario del programa auxiliar Risk® para Excel se encontraron las distribuciones con una breve descripción y diversas funciones para aplicaciones en simulación. La distribución Beta indicada por el programa Experfit corresponde a una distribución Beta General, ya que indica un parámetro mínimo y máximo. Esta distribución se deriva de la distribución Beta al escalar su rango para tener los valores mínimo y máximo [24].

4.1.1 Tiempos entre arribos o llegada de cada correo

Al aplicar la ecuación (5) para la distribución Beta, es posible hallar el valor esperado de la función $E[A]$, también conocido como el valor promedio $E[T_A]$ [25], que nos indica el tiempo promedio entre arribo de cada cliente. Para ello se hace uso del valor medio de la función de distribución Beta general, indicada en el manual de usuario del programa Risk®.

$$E[T_A] = \min + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (\max - \min) \quad (5)$$

Donde α y β son los parámetros de forma de la función de distribución y los valores mínimo y máximo el rango que se presentan en la Figura 1. Al reemplazar los parámetros obtenemos el siguiente resultado:

$$E[T_A] = 0,0287 + \frac{0,9039}{0,9039 + 3,4474} (7,5685 - 0,0287) = 1,5949$$

Lo que indica que el tiempo promedio entre arribos es de 1,5949 minutos o 1 minuto con 35,694 segundos por afiliado.

4.1.2 Tiempo de servicio

El tiempo de servicio corresponde a la distribución Log Logística, la cual es una versión extendida y generalizada de la distribución Log Logística de 2 parámetros [26]. De la misma manera que con la distribución Beta, es posible hallar el valor esperado $E[s]$ o tiempo promedio del servicio con la ecuación (6), utilizando el valor medio de la distribución Log expresada en el manual de usuario del programa Risk®.

$$E[T_s] = \beta \theta \csc(\theta) + \gamma \text{ para } \alpha > 1 \quad (6)$$

Donde β es el parámetro de escala, α es el parámetro de forma, γ es el parámetro de ubicación y θ un valor definido en la ecuación (7) para calcular el ángulo de la cosecante como un valor incógnito con el inverso multiplicativo del parámetro de la forma α por el coeficiente matemático π , utilizando los parámetros obtenidos en la Figura 1 para la función de distribución para tiempos de servicio.

$$\theta = \frac{\pi}{\alpha} \quad (7)$$

Haciendo el reemplazo de las variables obtenemos el siguiente resultado:

$$E[T_s] = 2,751 \left(\frac{\pi}{3,157} \right) \csc \left(\frac{\pi}{3,157} \right) 4,242 = 7,5048$$

Por lo tanto, el tiempo promedio de servicio es de 7,5048 minutos o 7 minutos con 30,288 segundos por cliente. Dado que los tiempos, tanto de servicio como de arribos siguen una distribución no exponencial se plantea el uso del modelo $G/G/s$, aplicando la fórmula de aproximación de Sakasegawa [27] para modelos $M/M/s$ y extendida por Hopp y Spearman [28] para modelos $G/G/s$ [29].

Allen y Cunneen desarrollaron una de las primeras aproximaciones para los modelos $G/G/s$ basados en la aproximación de difusión de Kingman y Köllerström. Posteriormente, Hall ajustó la fórmula para servidores múltiples [29]. La fórmula de Allen y Cunneen combina el modelo general de colas con la utilización de los servidores, $\rho = \lambda/(s*\mu)$, considerando la utilización como ρs [25].

Para hallar el tiempo promedio de espera CTq de un modelo con distribuciones no exponenciales se deben aplicar las varianzas de cada distribución independiente, haciendo el tiempo de espera sensible a la variabilidad de la distribución [25]. Dada las varianzas, se calcula el coeficiente de variación C para los tiempos entre arribos y el tiempo de servicio, lo que servirá para las fórmulas de Allen/Cunneen y Sakasegawa. Müller indica una fórmula para hallar el coeficiente de arribos y servicio entre horas, la cual consiste en dividir la desviación estadística σ entre el tiempo medio esperado E , en la ecuación (8) se indica

la ecuación resultante para el tiempo de arribos y de servicio, expresando la σ como la raíz de la varianza estadística σ^2 para hallar los coeficientes de arribos y servicio entre horas.

$$C_A = \frac{\sqrt{\sigma_{[A]}^2}}{E[T_A]} \quad C_S = \frac{\sqrt{\sigma_{[S]}^2}}{E[T_S]} \quad (8)$$

La varianza para el tiempo entre arribos siguiendo una distribución Beta se calcula de la ecuación (9).

$$\sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} (\max - \min)^2 \quad (9)$$

Reemplazando los parámetros se obtiene que $\sigma_{[A]}^2$.

$$\sigma_{[A]}^2 = \frac{(0,9039)(3,4474)}{(0,9039+3,4474)^2(0,9039+3,4474+1)} (7,5686 - 0,0287)^2 = 1,7483$$

Para el tiempo de servicio, el cual sigue una distribución Log Logística, su varianza se calcula con la ecuación (10) varianza T[s].

$$\sigma^2 = \beta^2 \theta [2 \csc(2\theta) - \theta \csc^2(\theta)] \quad (10)$$

for $\alpha > 2$

Por lo tanto, tenemos que $\sigma_{[S]}^2$.

$$\sigma_{[S]}^2 = (2,751)^2 \left(\frac{\pi}{3,157} \right) \left[2 \csc \left(2 \frac{\pi}{3,157} \right) - \left(\frac{\pi}{3,157} \right) \csc^2 \left(\frac{\pi}{3,157} \right) \right] = 5,8389$$

Con los tiempos de servicio y arribos es posible hallar la tasa a la que se mueve el sistema, siendo la tasa de arribos $\lambda = 1/E[TA]$ y la tasa de servicio $\mu = 1/E[TS]$ obtenemos que:

$$\lambda = \frac{1}{1,5949} = 0,6269 \frac{\text{clientes}}{\text{minuto}} = 37,61 \frac{\text{clientes}}{\text{hora}} \quad \text{y}$$

$$\mu = \frac{1}{7,5048} = 0,133 \frac{\text{clientes}}{\text{minuto}} = 7,98 \frac{\text{clientes}}{\text{hora}}$$

Lo que nos indica que en promedio llegan aproximadamente 38 clientes, correos para esta investigación, por hora y se atienden ocho por hora por cada servidor, con cinco servidores, se atenderían 40 clientes por hora. Con esta información es posible hallar el tiempo de espera promedio. Como se ha mencionado, se plantea usar la fórmula de Sakasegawa para servidores múltiples, comparando el tiempo promedio de espera con el obtenido con la ecuación (11) Aproximación de Allen y Cunneen para servidores múltiples y ajustada por Hall.

$$CT_q(G, G, s) = \frac{\rho_s/\mu}{1-\rho} * \frac{C_A^2 + C_S^2}{2s} \quad (11)$$

El modelo de Sakasegawa establece una aproximación a la longitud media de la cola aproximando la forma β de una cola M/M/s a la razón $\sqrt{2(s+1)}$ (Sakasegawa, 1977), posteriormente fue Hopp y Spearman quien realizó la aproximación a la forma $\sqrt{2s+2} - 1$, para modelos de colas G/G/s [29] presentado en la ecuación (12) Aproximación de Hirotaka Sakasegawa para servidores múltiples de un modelo M/M/s y ajustada por Wallace y otros para modelos G/G/s.

$$CT_q(G, G, s) = \left(\frac{C_A^2 + C_S^2}{2} \right) \left(\frac{\rho \sqrt{2s+2} - 1}{s(1-\rho)} \right) \left(\frac{1}{\mu} \right) \quad (12)$$

Los tiempos obtenidos por las dos fórmulas se presenta en la Tabla 1, donde puede apreciarse que el modelo de Sakasegawa indica un tiempo menor de espera en el sistema, con una diferencia de 0,807 minutos respecto del modelo de Allen y Cunneen, sin embargo, ninguno de los tiempos se ajusta a los

tiempos observados en el área, ya que indica que el tiempo promedio de espera de un correo es de 8 a 10 minutos cuando suelen ser de cinco a siete días. Aun así, el modelo es correcto, como se menciona anteriormente, los funcionarios realizan diferentes actividades, también el gestionar una autorización puede requerir respuesta de otro prestador o de la EPS directamente, lo que toma un tiempo de hasta cinco días. El modelo que se presenta de teoría de colas brinda una aproximación para el sistema en condiciones estables, suponiendo una atención continua y con un tiempo determinado por la distribución Log Logística.

Tabla 1. Tiempos de espera con el modelo de Sakasegawa y Allen/Cunnen

Ca ²	0,687
Cs ²	0,104
M	0,133
L	0,627
R	0,941
WT Sakasegawa	8,677
WT Allen/Cunneen	9,484

El modelo de aproximación de Sakasegawa y Allen Cunneen dan una perspectiva del tiempo de espera para una atención continua, sin embargo, es posible que el tiempo de espera, aún con una atención constante de 5 servidores, pueda ser mayor, considerando que el horario de atención es de 5:00 a.m. a 9:00 p.m. y los correos arriban en promedio entre las 4:30 a.m. y las 11:30 p.m., por lo tanto, en un día se cuenta con 16 horas de servicio, divididas en dos turnos de asesores, y 19 horas de arribos, lo que incurre que aquellos correos enviados a las 4:30 a.m. tendrán que esperar a ser atendidos a las 5:00 a.m. hora en que inicia el primer turno, eso en caso que el día anterior no hayan quedado correos sin atender, de lo contrario tendrán que esperar a que sean respondidos los correos que llegaron después de las 9:00 p.m., hora en que finaliza el segundo turno y aquellos que no hayan sido respondidos de días anteriores por alguna situación que escape de las restricciones manejables por cada equipo de asesores. También se debe tener en cuenta que domingos y festivos no se responden autorizaciones, aumentando el tiempo de respuesta a uno o más días.

4.2 Simulación del proceso

Para hacer un análisis de un entorno similar se realiza una simulación matemática en Microsoft Excel, tomando en cuenta lo mencionado y haciendo uso de las funciones de densidad de las distribuciones de probabilidad para los tiempos entre arribos y de servicio se realiza una simulación para dos semanas. La Tabla 2 relaciona los resultados de la simulación, como el tiempo de espera Wq , el promedio de correos en espera Lq y el tiempo promedio de espera para un día, haciendo una comparación con los tiempos de espera obtenidos por teoría de colas.

Tabla 2. Comparación de los resultados de la simulación con diferentes servidores.

Servidores	Tiempo promedio de espera en cola	Tiempo promedio de espera para un día	Promedio de correos en espera
4	55:51:22	2:02:26	1194
5	25:51:18	0:16:46	598
6	4:31:39	0:10:03	113
7	2:12:48	0:08:34	40

Comparando el tiempo de espera obtenido con 5 servidores, se encuentra cerca del doble de lo sugerido con los modelos de teoría de colas, el tiempo de espera que más se asemeja es con 7 servidores. También se evidencia que el tiempo esperado para las dos semanas está muy alejado de lo hallado con la teoría de colas, con más de un día de espera.

Con la Figura 2 puede distinguirse que, con el número de servidores actuales, la cola de correos, así como los tiempos se tienden a nivelar a cerca de 48 horas pasadas las dos semanas. Sin contar el tiempo destinado a las otras actividades de los gestores de autorizaciones, o los tiempos de respuesta de los otros prestadores, se plantea disminuir los tiempos de cola, ordenando los correos y distribuyendo por igual cantidad a los funcionarios, para agilizar su gestión y reducir el tiempo de servicio, refiriendo a búsquedas y consultas de validación del paciente.

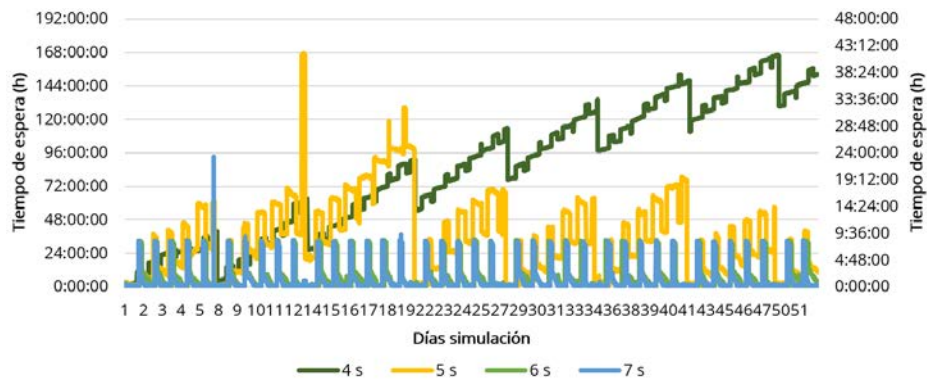


Figura 2. Evolución de los tiempos de espera en dos semanas. El eje principal, eje izquierdo, indica las horas de espera para un sistema con 4 servidores. El eje secundario, eje derecho, indica las horas de espera para un sistema con 5, 6 y 7 servidores

4.3 Asignación de las solicitudes de servicio en los buzones para los gestores

El método Round Robin, es el encargado de asignar los correos de la bandeja de entrada en las carpetas de cada uno de los gestores, como se muestra en la Figura 3. Cuando el aplicativo termina finaliza la cola y, por ende, el algoritmo.

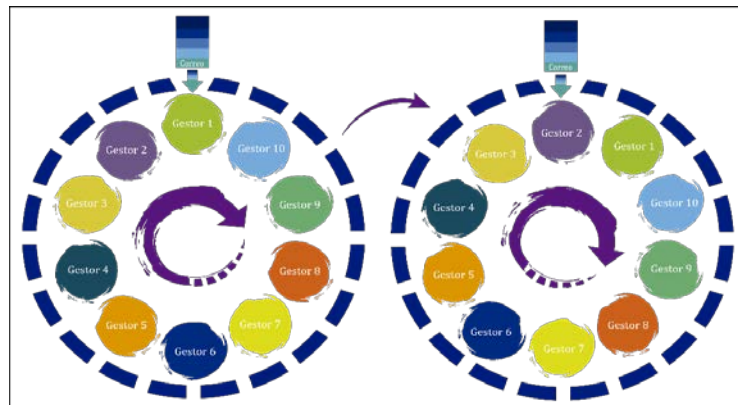


Figura 3. Asignación de correos a la carpeta de los gestores usando el método Round Robin

Un proceso importante para la gestión del buzón es la clasificación de las solicitudes de servicio en los buzones de cada gestor, acorde al tipo de procedimiento que se debe autorizar. Para el desarrollo de la estructura de clasificación se plantea el uso de reglas que operen en el aplicativo y no en Microsoft Outlook 365, esto debido a que funciona de manera íntegra con el algoritmo de Round Robin. El aplicativo hace uso de tres reglas principales para la gestión del buzón:

1. La primera, evalúa el *remitente* y lo compara con una lista de *remitentes no esperados*, por ejemplo, mensajes de Microsoft o de la dirección de la empresa, también aquellos de publicidad. Si encuentra similitud con la lista, elimina el mensaje, de lo contrario continúa con la segunda regla. La lista de *remitentes no esperados* se almacena en una de las hojas de Excel, permitiendo cambiar, eliminar o añadir más remitentes.
2. La segunda regla evalúa el *asunto* y el *cuerpo del mensaje*, buscando palabras clave para identificar el tipo de procedimiento, si lo identifica continúa con la tercera regla, en caso contrario, mueve el mensaje a una carpeta *No identificados* para que un gestor evalúe el correo, si encuentra palabras relacionadas a publicidad u otro tipo de correos ajenos al propósito del buzón, lo elimina. Si encuentra palabras que no puede interpretar utiliza el corrector de ortografía Microsoft Excel para cambiar la palabra a la primera que el corrector encuentre y así evaluarla. De igual manera a la lista de remitentes no esperados, la lista de palabras *clave* se almacena en una hoja de Excel.
3. La tercera regla evalúa si el correo contiene archivos adjuntos, de no contener responde de manera automática al *remitente* indicándole que para autorizar su procedimiento debe adjuntar la solicitud de autorización en un archivo de formato PDF o de imagen (PNG, JPG, ...). Si el mensaje contiene archivos

adjuntos, utiliza el algoritmo *Round Robin* para mover el correo a la carpeta del gestor en cola y, con base al procedimiento que interpretó, mover el correo a la subcarpeta del procedimiento. El aplicativo usa un contador para analizar los correos clasificados y asignados a cada gestor.

4.4 Diseño del algoritmo de filtrado y asignación de solicitudes de autorizaciones de servicios de salud y desarrollo del aplicativo

El algoritmo sigue la secuencia de pasos que realiza la funcionaria encargada de la distribución y clasificación de los correos con las solicitudes de autorizaciones de servicios de salud, omitiendo algunos pasos, como el mover todos los mensajes recibidos a una carpeta de filtro para leer cada mensaje y clasificarlo, así como mover los correos filtrados a otra carpeta para asignarlos a los gestores, ya que el programa tendrá estas capacidades. En la Figura 4 se muestra un diagrama de flujo con el proceso que debe realizar el programa.

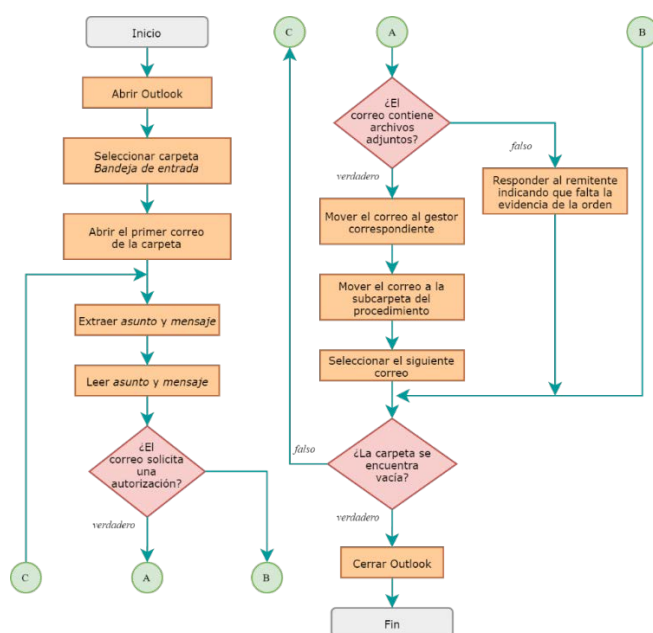


Figura 4. Diagrama de flujo del programa

El aplicativo debe ser capaz de leer los mensajes de la bandeja de entrada, interpretando su propósito, basándose en el cuerpo y el asunto del mensaje. Si el mensaje se dirige hacia la IPS, evalúa si tiene archivos adjuntos, de no tener, el programa debe generar una respuesta inmediata. Cuando el mensaje incluya archivos adjuntos, el programa lo asigna a un gestor haciendo uso del método de planificación Round Robin, para luego clasificarlo en subcarpetas, acorde al procedimiento que indica autorizar.

El algoritmo utiliza tres funciones de respaldo que le ayudan a evaluar las carpetas, identificar errores y alertar al usuario cuando lo necesita. La primera de ellas evalúa la existencia de las carpetas con base a la ruta que se encuentra en la hoja de información, la segunda envía los errores a un formulario para mostrarlos en una casilla de texto y la tercera reproduce un sonido para alertar al usuario cuando se ha generado un error.

El algoritmo se implementa en un programa en el entorno de desarrollo VBA de Microsoft Excel, para ello se indican las tareas a ejecutar en fracciones de código con Macros que comprende de 10 partes que se encargan de la distribución y clasificación de los correos:

1. La primera sección del código para el algoritmo consta de las variables que se utilizan para la ejecución de Microsoft Outlook y para el almacenamiento de los recursos necesarios para la clasificación y distribución de los correos en las carpetas.
2. La segunda sección del código declara las variables de control de los correos, también las variables necesarias para las validaciones que realizan las palabras clave, iniciando con el remitente, luego el asunto, el cuerpo del mensaje y luego el procedimiento.

3. La tercera sección declara los contadores y las variables booleanas que indican si el programa continúa con el análisis de un correo o no. Los contadores son usados para las métricas y estadísticas generadas tras cada uso del programa, estas estadísticas las indica en la hoja Reportes del programa.
4. La cuarta sección establece los valores de las variables principales y lee la cantidad de autorizadores, procedimientos y palabras clave de las hojas Información y Palabras_Clave del archivo Excel.
5. La quinta sección inicia el programa, al haber declarado y asignado valores a sus variables prioritarias, inicia el algoritmo presentado en el diagrama de flujo, esta primera parte extrae el asunto, mensaje, remitente o autor y la dirección de correo para cada uno de los elementos en la carpeta seleccionada para leer los correos. La carpeta es indicada por el autorizador en el panel de Ajustes del programa. Al extraer el remitente comprueba si es una dirección no relevante, si así es entonces indica mediante la variable booleana *continuar*, que no debe seguir gestionando el correo, en ese caso lo moverá a la carpeta de correos No relevantes y evaluará el siguiente correo.

Si el remitente no es identificado como irrelevante continua con el análisis del asunto, utilizando la variable booleana *evaluar_procedimiento* para indicar si ha identificado una palabra clave en el asunto. De no identificarla la evalúa en el cuerpo del mensaje del correo, usando la misma variable booleana *evaluar_procedimiento*. Si da el caso que no coincide ninguna palabra clave, mueve el correo a la carpeta de No identificados y continua con el análisis del siguiente correo.

Cuando identifica el mensaje o el asunto del correo, evalúa el número de archivos adjuntos en el correo, si el correo no tiene archivos adjuntos o están rotos, responde al remitente con el mensaje de respuesta automática que indica el gestor en la hoja Respuestas_Automáticas, seguido de ello mueve el correo a la carpeta de respuestas automáticas y agrega una unidad al contador de respuestas automáticas. Si el correo contiene archivos adjuntos evalúa la palabra clave del procedimiento, si la identifica en el asunto utiliza la variable booleana *proc_identificado* para continuar con la sección de Round Robin, de lo contrario evalúa el procedimiento en el cuerpo del mensaje.

Cuando identifica la palabra clave, lee el procedimiento al que está relacionado. Si no identifica el procedimiento en el cuerpo del mensaje o la palabra clave no está relacionada a ningún procedimiento, asigna el correo a la carpeta de Otros Procedimientos.

6. Para distribuir el correo al gestor correspondiente lee el valor del turno del gestor, si es 0 significa que no debe asignarse el correo aún, si es 1, es el turno de ese gestor.
7. Si no indica el turno del gestor, indica un mensaje de error al usuario y finaliza el programa.
8. Si encuentra la posición del gestor en turno, valida que la carpeta del procedimiento exista, de lo contrario crea una subcarpeta con el nombre del procedimiento en la carpeta del gestor. Posteriormente mueve el correo a la carpeta del procedimiento, incrementando una unidad el contador de correos distribuidos, también de correos asignados a ese procedimiento para el gestor determinado.
9. La segunda parte de *Round Robin* ocurre seguidamente, continuando el ciclo de turnos. Primero establece en 0 el turno del gestor actual y evalúa si el gestor es el último autorizador, de serlo establece en 1 al primer autorizador, en caso contrario establece el turno para el siguiente autorizador.
10. Después de asignar el correo al gestor y clasificarlo en un procedimiento, establece en nulo los valores de los campos del correo y continúa con el siguiente, agrega una unidad al contador de correos gestionados y se continúa con el siguiente correo.

Al finalizar el ciclo principal, luego de leer todos los correos de la carpeta, indica la cantidad de distribuidos, respondidos, no relevantes y no identificados en la hoja de Reportes, también como mensaje de voz.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Aportes de minería de datos a la clasificación de correos

Como se presentó en el algoritmo, se utilizan listas de palabras claves para identificar si un correo se dirige al área y debe ser procesado, estas listas complementan al algoritmo y se encuentran en las hojas de cálculo del archivo.

Para la identificación del correo, se desarrollaron cuatro listas de palabras clave, para el asunto, el mensaje, el remitente y el procedimiento. Las listas están desarrolladas con base a los correos de prueba extraídos del buzón.

La lista de palabras clave del remitente se desarrolló con las direcciones de los correos recurrentes que se eliminaban. El proceso para determinar las palabras clave del asunto, el mensaje y el procedimiento consistió en cinco etapas:

1. La primera etapa extrae la información de cada correo, la fecha de recibido, el remitente, el asunto, el mensaje, la fecha de respuesta y si tenía archivos adjuntos. Para ello se desarrolló una macro diferente que extraía esta información. La fecha de recibido y de respuesta fueron de gran ayuda para el análisis del proceso, con la teoría de colas y la simulación.
2. La segunda etapa consistió en separar cada cadena de texto, del asunto y el mensaje, descomponiéndola por palabras. El asunto más largo contenía 24 palabras, en su lugar, el mensaje más extenso contenía 651 palabras. Para evaluar en condiciones semejantes los mensajes, se tomaron las 100 primeras palabras de cada uno.
3. La tercera etapa genera una lista con todas las palabras para el asunto y el mensaje, haciendo uso de una macro se organizó cada palabra de cada cadena de texto. Seguidamente se eliminaron las palabras duplicadas, con la función de Quitar Duplicados de la herramienta de datos de Microsoft Excel.

De esta manera usando la función CONTAR.SI se identificaron el número de veces que aparecía cada palabra. En la Tabla 3 se indican las palabras que más se encuentran en el asunto.

Tabla 3. Palabras más reiteradas en los asuntos de los correos

Palabras no repetidas	Número de veces	Porcentaje sobre el total
Autorizar	212	14,83%
Autorización	62	4,34%
de	57	3,99%
Autorización	39	2,73%
CC	22	1,54%
Solicitud	22	1,54%
CITA	21	1,47%

Como ejemplo se presenta la palabra Autorización, que se encontraba de diferentes maneras, por ese motivo, la cuarta etapa consiste en descomponer cada palabra relacionada en letras, identificar la cantidad de caracteres que tienen en común antes de cambiar. Véase en la Tabla 4 la descomposición de las diferentes maneras de la palabra Autorización, palabra principal para el asunto.

Tabla 4. Descomposición de las palabras relacionadas con Autorización

# de veces	# caracteres	Palabras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	8	Autoriza	A	u	t	o	r	i	z	A						
39	12	Autorización	A	u	t	o	r	i	z	A	c	i	o	n		
62	12	Autorización	A	u	t	o	r	i	z	A	c	i	ó	n		
11	14	Autorizaciones	A	u	t	o	r	i	z	A	c	i	o	n	e	s
1	10	AUTORIZADO	A	U	T	O	R	I	Z	A	D	O				
212	9	Autorizar	A	u	t	o	r	i	z	a	r					
2	10	AUTORIZAR-	A	U	T	O	R	I	Z	A	R	-				
2	10	Autorizar,	A	u	t	o	r	i	z	a	r	,				
9	10	Autorizar.	A	u	t	o	r	i	z	a	r	.				
1	12	Autorizar...	A	u	t	o	r	i	z	a	r	.	.	.		
1	13	Autorizar-luz	A	u	t	o	r	i	z	a	r	-	l	u	z	
341		Palabras Clave	A	U	T	O	R	I	Z	A						

La quinta etapa clasifica las palabras clave en tres grupos, palabras clave principales, palabras clave para procedimientos y palabras clave relacionadas con el sector y el servicio, otorgando prioridad a las palabras clave principales y las de procedimientos.

Bajo este método fueron identificadas 76 palabras clave para el asunto, 25 para mensaje y 48 para procedimientos. Se identificó que el promedio de los mensajes contiene una sola palabra clave, las demás palabras indican la información del paciente.

Las cuatro listas de palabras clave se encuentran en el aplicativo en la hoja *Palabras_Clave*, la hoja *Información*, indica las rutas de todas las carpetas que se deben usar, la cantidad de gestores, de procedimientos, la carpeta de cada gestor y el turno de cada uno. También cuenta con un contador de las veces que se ha utilizado el aplicativo.

Por otra parte, en la hoja de reportes el aplicativo indica la cantidad de correos gestionados con cada ejecución del programa, junto con la fecha y hora de ejecución. A su vez, la hoja de *Respuestas_Automáticas* contiene la respuesta que debe utilizar el programa para responder cuando un paciente no adjunta la foto de la orden de servicios emitida por el médico durante la cita. Para cada respuesta automática, el gestor encargado del programa puede cambiar la respuesta al editarla en la misma celda.

5.2 Desarrollo de la Interfaz

La interfaz permite la interacción de cualquier usuario con el programa, permite establecer parámetros y criterios para la ejecución del programa y el cumplimiento de su función sin inconvenientes. En la hoja Inicio, el usuario encuentra el logo de la empresa junto con un único botón para ejecutar el programa. Al dar clic en el botón, se abrirá el formulario de inicio, desde ahí se pueden elegir cuatro opciones: Iniciar el programa, ver los Reportes, ir a Ajustes y Cancelar el formulario.

- **Iniciar el programa:** El botón de Iniciar el Programa ejecuta el algoritmo, automáticamente muestra un formulario con una animación, mientras procesa los correos de la carpeta que se ha especificado para leer. Si se presenta un error en medio del proceso, se anula y reproduce el sonido elegido, mostrando un nuevo formulario con el mensaje del error. Cuando el programa finaliza sin inconvenientes, indica en una nueva pantalla la cantidad de correos que ha gestionado de cada tipo. Si no hay correos para clasificar el programa le indica al usuario en una nueva pantalla.
- **Ver los Reportes:** El botón de Reportes dirige al usuario a la hoja de reportes, para un uso más simple no se encuentra oculta la hoja, tampoco bloqueada, de manera que el usuario pueda interactuar con ella sin inconvenientes.
- **Ir a Ajustes:** Si el usuario decide ir a los ajustes del programa encontrará un formulario en el que puede cambiar todas las carpetas, el número de autorizadores y el número de procedimientos. Si decide cambiar los procedimientos se abrirá un nuevo formulario, donde podrá ver las palabras clave y los procedimientos relacionados con ellas. Este formulario consta de 2 partes, la primera indica los procedimientos actuales, si da doble clic sobre uno podrá ver las palabras claves asociadas a ese procedimiento, allí podrá elegir cuáles eliminar o si desea, puede agregar más. Al lado de la lista de procedimientos se encuentran 3 botones, los cuales le permiten añadir un nuevo procedimiento, eliminar uno o cambiarle el nombre, para que funcionen los botones debe seleccionar un procedimiento de la lista. La segunda parte indica las palabras clave, también cuenta con 3 botones, uno para agregar una nueva palabra clave, otro para asignarle un procedimiento, si ya tiene uno puede reasignarle el procedimiento, y un botón para eliminar la palabra clave.
- **El botón de regresar** cierra el formulario de los ajustes del procedimiento y regresa el usuario al formulario de ajustes generales. Dado que la respuesta automática la ingresa el usuario a una celda, directamente, no se justifica crear un formulario para ello.

5.3 Gestión del aplicativo

El aplicativo iniciará la gestión del buzón cuando un gestor líder lo indique, usando un botón configurado para ejecutar las macros programadas. Una vez el aplicativo finalice la gestión, cerrará el aplicativo Microsoft Outlook e indicará al gestor líder la cantidad de correos filtrados, eliminados y asignados a cada gestor. Para probar el programa se seleccionaron 140 correos con diferentes solicitudes de servicios y 40 correos tipo

spam o incompletos. Al ejecutar el programa se obtuvo un nivel de certeza del 97%, con un tiempo de 90 segundos. Los correos no identificados o mal interpretados se debieron a las variaciones ortográficas de las palabras (las tildes), sin embargo, al añadir esas variaciones como palabras clave, incrementa el nivel de confianza. Una vez realizadas las pruebas con diferentes conjuntos de correos, se recomiendan algunas mejoras como:

- Realizar un estudio de tiempos para identificar el tiempo real de servicio y de arribo para los correos. Con un análisis concreto se pueden decidir medidas para reducir los tiempos de espera y evitar sanciones de la Super Salud.

En cuanto a la ejecución del programa:

- Se recomienda periódicamente realizar revisiones de las listas de palabras y correos no deseados por parte de los gestores de manera que se aproveche su conocimiento para la validación de términos claves.
- En cuanto a la inclusión de sinónimos, es recomendable analizar la posibilidad de incluir la revisión de sinónimos para robustecer las listas de palabras clave.
- En el mensaje de respuestas automáticas es recomendable indicar los motivos por los que el archivo no se identificó. Entre las causas de esta situación durante la investigación se encontró que predomina la falta de las imágenes de soporte, ya que el usuario no lo envió o a que el archivo se dañó, esto evitaría respuestas innecesarias de los pacientes dando explicaciones del mensaje.
- El programa no analiza correos duplicados o enviados más de una vez por la misma persona, por lo que se recomienda generar un nuevo módulo que se encargue de esta situación para evitar generar más de una autorización al mismo paciente.

6. CONCLUSIONES

El análisis de los tiempos de espera para cada correo no es posible identificarlo con un modelo de teoría de colas, dado que indica tiempos muy cortos al suponer un proceso de nacimiento y muerte continuo y homogéneo con el tiempo de servicio. Sin embargo, en el área no se evidencia este comportamiento, los tiempos de llegadas y de servicio son independientes y tienen comportamientos que se pueden describir por distribuciones Beta y Log-Logistic respectivamente. Bajo este comportamiento la simulación indica tiempos más aproximados a la situación real del proceso, pero tampoco describe su comportamiento real. Con la simulación se identifica que el proceso se estabiliza cerca de las 24 horas de haber arribado un correo. Se comprueba ese hecho al compartir el resultado con una de las compañeras encargadas del proceso, indicando que debido a sus otras actividades los tiempos de espera se extienden a lo que actualmente se observa entre cinco y ocho días.

Con base al análisis de la simulación se identifica que siete autorizadores en turno pueden procesar las solicitudes de autorizaciones en un tiempo menor al previsto por la resolución 1552 de 2013, sin embargo, disponer de cinco autorizadores cumple con el tiempo de cinco días, tomando en cuenta que solo realicen la actividad de autorizaciones, al distribuir su tiempo con las otras dos actividades deberán planificar la cantidad de tiempo dispuesta a cada una, para evitar demoras en las autorizaciones.

Microsoft Excel puede realizar múltiples tareas con ayuda de las macros, convirtiéndose en una herramienta útil para la automatización de las tareas. Con el desarrollo del programa se identifica que es posible automatizar la gestión de las autorizaciones, en un entorno compartido de Office con las otras aplicaciones diseñadas para automatización, vinculando Sharepoint, Azure y otras aplicaciones que gestionan muchas de las actividades realizadas en la compañía. Bien podría hacerse uso de herramientas como PowerApps, sin embargo, el costo de este tipo de licencias aumentaría los costos de operación por lo que esta posibilidad se analizará en una próxima fase de este trabajo.

Los archivos adjuntos corruptos o dañados no son tomados en cuenta por la variable que manipula los ítems del correo (propertyAccessor), suponiendo que los correos no traen archivos adjuntos. Esto sin

embargo es bueno, si el programa lo clasificara generaría un reproceso dado que los autorizadores no podrían identificar la orden, pero es necesario incluir en el mensaje de respuestas automáticas que el archivo no se encuentra o está dañado, para que los pacientes tomen medidas al enviar sus archivos adjuntos.

REFERENCIAS

- [1] Minsalud, «minsalud,» 2 Agosto 2020. Recuperado: <https://www.minsalud.gov.co/salud/Paginas/Glosario.aspx>
- [2] C. H. Escudero, «Manual de auditoría médica,» de *Manual de auditoría médica*, Buenos Aires, Editorial Dunken, 2013, p. 502.
- [3] Secretaría Distrital de Gobierno, Manual de Atención a la Ciudadanía, Bogotá, 2017.
- [4] R. M. A. Mohammad, «A Lifelong Spam Emails Classification Model,» *Applied Computing and Informatics*, 2020.
- [5] B. Alexy y S. M. Hazarika, «E-mail spam filtering: a review of techniques and trends,» de *Advances in Electronics, Communication and Computing*, 2017, pp. 583-590.
- [6] J. C. G. C. Valentín Morales Moreno, «Clasificación De Correos Electrónicos Usando Características Superficiales Y Profundas,» *Jovenes en la Ciencia*, 2019.
- [7] T. C. K. C. G. Mikolov, «Efficient estimation of word,» de *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR 2013)*, 2013.
- [8] S. R. W. G. I. F. M. Eman M. Bahgat, «Efficient email classification approach based on semantic methods,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, nº 4, pp. 3259-3269, December 2018.
- [9] R. N. R. C. Rofiat Alli, «Detecting advance fee fraud emails using self-referential pronouns: A preliminary analysis,» *Accounting forum : advancing the interdisciplinary and global connection of accounting research.*, vol. 42, pp. 78-85, 2018.
- [10] M. Freiermuth, «"This transaction is 100% Risk-Free!" Why do people fall prey to email scams?,» de *International Conference on Language and Communication*, 2011, pp. 222-230.
- [11] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, Introducción a la investigación de operaciones, Mexico: Mc Graw-Hill, 2010.
- [12] D. R. Anderson, D. J. Sweeney, T. A. Williams, J. D. Camm y K. Martin, Métodos cuantitativos para los negocios 11 edición, México: Cengage Learning, 2011.
- [13] E. H. García, *Sobre los sistemas de colas*, UEX, 2001.
- [14] H. A. Taha, Investigación de Operaciones Novena edición, México: Pearson, 2012.
- [15] R. C. Abad, Introducción a la simulación y a la teoría de colas., La Coruña: Netbiblo, 2002.
- [16] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, Introducción a la investigación de operaciones, México: The McGraw-Hill, 2010.
- [17] W. L. Winston, Investigación de operaciones Aplicaciones y algoritmos 4 edición, Mexico: Thomson, 2005.
- [18] W. Stallings, Sistemas Operativos Aspectos internos y principios de diseño 5 edición, Madrid: Pearson, 2005.
- [19] G. Wolf, E. Ruiz, F. Bergero y E. Meza, Fundamentos de sistemas operativos, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [20] M. Halvorson, Start Here! Learn Microsoft Visual Basic 2012, California: O'Reilly Media, 2012.
- [21] D. Zak, Programming with Microsoft® Visual Basic® 2017, 8 edition, Boston: Cengage Learning, 2018.
- [22] B. Jelen y T. Syrstad, Excel 2016 VBA and Macros, Indianapolis: QUE, Pearson, 2015.
- [23] M. Alexander, Excel Macros For Dummies, Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [24] Palisade Corporation, Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft® Excel, Ithaca, NY USA: Palisade Corporation, 2016.
- [25] B. Müller-Clostermann, Using G/G/m-Models for Multi-Server and Mainframe Capacity Planning, Essen: Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik (ICB), Universität Duisburg-Essen, 2007.
- [26] V. P. Singh, «ENTROPY-BASED PARAMETER ESTIMATION IN HYDROLOGY,» *Water Science and Technology Library v.30*, p. 297, 1988.
- [27] H. Sakasegawa, «An approximation formula $L \sim \frac{p}{1-p}$,» *Ann. Inst. Statist. Math*, pp. 67-75, 1977.
- [28] W. J. Hopp y M. L. Spearman, FACTORY PHYSICS Foundations of Manufacturing Management, New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [29] G. L. Curry y R. M. Feldman, Manufacturing Systems Modeling and Analysis, New York: Springer, 2009.

Retos de las facultades de ingeniería para formar y capacitar a los profesionales en un siglo de cambios permanentes

Omar Iván Trejos Buriticá¹
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

En medio del dinamismo que se vive en el mundo en este siglo, cuando los cambios dramáticos suceden en una sola generación y se establece una diferencia con otras épocas, la ingeniería ha tomado un papel relevante y, con ella, la formación de Ingenieros ha generado una serie de reflexiones que invitan a repensar la manera como se preparan para articularse con la sociedad que los espera. Teniendo en cuenta que la docencia se ha convertido en una de las más fuertes aristas laborales para los Ingenieros y que el aporte que el corpus de conocimiento relacionado todavía es inconmensurable, conviene pensar en los retos que tienen los ingenieros docentes, cuando deben formar y capacitar a los estudiantes de ingeniería para enfrentar los problemas del siglo XXI, y para resolver cuestiones *sui generis* como las que ha originado la pandemia del Covid-19. A través de canales de comunicación como WhatsApp y correo electrónico, en esta investigación se consultó la opinión cualitativa de ingenieros docentes ubicados en diferentes universidades. Se recopiló y se decantó la información desde lo cualitativo, y luego se cuantificó para comprenderla y describirla. Se concluye que el escenario académico es retador para los ingenieros docentes y que se necesita tener consciencia de dichos cambios para articularse, desde la formación de futuros ingenieros, con las necesidades y expectativas de la sociedad del siglo XXI.

¹ Contacto: omartrejos@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La docencia ha empezado a convertirse en una de las más fuertes opciones laborales y profesionales para los ingenieros [1] producto de diversos factores pero, entre otros, debido los aportes que la ingeniería provee en la solución de problemas, especialmente aquellos que siendo emergentes tienen tanta influencia en el escenario donde se desarrollan que incluso llegan a modificarlo, tal como la situación del Covid-19 que, a partir de sus restricciones de confinamiento, aislamiento y distanciamiento, ha permeado todos los niveles de la sociedad en todo el mundo, literalmente [2]. Dado que los ingenieros docentes no tienen formación en docencia sino en ingeniería, se exige a la luz de ese nuevo perfil laboral, que se capaciten en conocimientos propios de la educación dado que en esta labor no sólo se requiere saber sobre lo puramente disciplinar sino, además, saber compartir el conocimiento y la experiencia con los estudiantes por los caminos por los cuales el aprendizaje se cristaliza [3].

Por tales razones, el problema de investigación que inspira el presente trabajo se puede enmarcar en la necesidad de definir, comprender y asimilar: 1) las necesidades del mundo de hoy a partir de sus nuevos escenarios y de los problemas emergentes, 2) las exigencias a la Ingeniería por parte de la sociedad del siglo XXI, 3) los retos que se tienen en el proceso de formación de ingenieros especialmente para los ingenieros docentes, y 4) las condiciones cambiantes del mundo actual y su impacto en la vida cotidiana de la sociedad.

El propósito del capítulo es presentar los resultados de una investigación cualitativa que parte del levantamiento de información con ingenieros docentes, con administrativos y con estudiantes, por la vía de la cuantificación que describe los fenómenos y sin perder el norte de la investigación cualitativa que intenta comprenderlos, de forma que se puedan apropiarse elementos de juicio que posibiliten la articulación de los hoy estudiantes de ingeniería con la sociedad que los espera, y para lo cual se busca que los ingenieros docentes tengan consciencia de los retos que les esperan.

La novedad consiste en el planteamiento que se hace: 1) desde lo cualitativo acudiendo a las técnicas de investigación que posibilitan comprender el objeto de estudio y no solamente cuantificarlo, 2) desde la perspectiva de los ingenieros docentes para proveerles un nuevo enfoque en cuanto a la visión que pueden tener de su labor como ingenieros y profesores, y 3) desde la perspectiva de los estudiantes que, de una u otra forma, son los verdaderos protagonistas del aprendizaje pues serán los que lleven la posta de las soluciones a la sociedad a la cual se deben.

La presente investigación se justifica toda vez que el mundo de hoy tiene unas exigencias a la ingeniería diferentes de otros tiempos y que dichas exigencias requieren que se adecúen no sólo los currículos, las metodologías y los contenidos (por actualización y evolución natural del conocimiento) sino también que se replantee la forma como se relacionan los ingenieros docentes con sus estudiantes y la manera como esos estudiantes reciben el conocimiento disciplinar que los debe formar. Este trabajo es producto del proyecto de investigación 6-19-11 *Desarrollo de un modelo de enseñanza y aprendizaje que transversalice el conocimiento derivado de las Ciencias Básicas aprovechando la programación de computadores en Ingeniería de Sistemas basado en Brain Based Learning y Pensamiento Computacional* aprobado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira.

El contenido del capítulo llega hasta la presentación de los resultados y la exposición de una discusión alrededor de ellos, en el marco del formato estándar IMRYD, de forma que se hagan aportes a las opiniones que surgen al respecto de los retos que se plantean para los ingenieros docentes dentro de las restricciones Covid-19 y teniendo en cuenta las necesidades y escenarios del siglo XXI para la sociedad que lo vive. La información que se expone se recolectó durante el período comprendido entre el I semestre 2020 y el I semestre 2021 incluyéndolo, en el cual se han ejecutado las políticas de confinamiento, aislamiento y distanciamiento producto de la expansión del contagio que originó la pandemia Covid-19.

2. MARCO CONCEPTUAL

Aún a pesar de sonar como una *verdad de Perogrullo*, los programas de Ingeniería de las universidades forman a los ingenieros que la sociedad requiere en el inmediato futuro. Esto nos lleva a pensar muy bien

en lo que es la Ingeniería, cuál es el papel de los ingenieros en la sociedad del siglo XXI y qué características deben tener los programas de formación en Ingeniería para enfrentar los retos de la sociedad de hoy.

La Ingeniería se puede definir como el área del conocimiento que capacita a un profesional para acudir a su ingenio, fortalecerlo con métodos y metodologías definidas y decantadas, con el ánimo de resolver problemas que dificultan la interacción armónica entre el ser humano y su entorno bajo una mirada global, general y óptima [4]. De esta forma puede decirse entonces que la ingeniería incluye la capacidad que puede tener un ser humano para crear o inventar, sobre su base imaginativa, todo aquello que requiere de inteligencia y habilidad para combinar conocimientos, recursos, medios y posibilidades de que dispone.

Es la disciplina que se apoya en un conjunto de conocimientos especializados de carácter técnico con soporte científico que se pueden aplicar y que se han probado debidamente que posibilitan la invención, la planeación, el desarrollo, la elaboración, la puesta a punto y la perdurabilidad en el tiempo de soluciones asociadas a tecnologías, maquinarias, estructuras, materiales, sistemas, herramientas y procesos [5]. La Ingeniería busca ofrecer soluciones estables a problemas que vive el ser humano en sus diferentes contextos y en varios campos del saber.

Esto conlleva a que la Ingeniería sea el camino a través del cual: 1) se enfrentan muchos de los problemas que aquejan a la sociedad para resolverlos de forma estable, sistemática, general y, en muchos casos, definitiva, 2) se transforme el conocimiento llevándolo desde lo teórico a lo práctico tal que dicho conocimiento pueda ser útil a esa sociedad que lo requiere, 3) se beneficie la sociedad, la humanidad y el ser humano como ser independiente de los avances que se pueden derivar de ella, y 4) el ser humano puede localizar el espacio de conocimiento de donde pueden derivarse una gran cantidad de soluciones efectivas a sus problemas.

En la Ingeniería lo científico, lo teórico, lo experimental y lo empírico convergen para hacer uso eficiente tanto de los elementos conceptuales que los sustentan como de los recursos y medios que se tienen disponibles de forma que se puedan enfrentar desde los problemas que el mismo ser humano, en su evolución, se genera hasta las situaciones que son causadas por las fuerzas de la naturaleza y que perjudican a grandes sectores de la sociedad en diferentes lugares del mundo [6].

Por las características que se han expuesto, la Ingeniería se considera un arte pues requiere de gran capacidad imaginativa de quienes la encarnan, así como del despliegue de creatividad que resuelva situaciones problemáticas que lleva a construir elementos, dispositivos, herramientas y máquinas que no existen y ponerlas en escena para que los problemas se atenúen o desaparezcan.

El profesional que representa a la Ingeniería ante la sociedad es el ingeniero cuyo papel implica la realización de diseños y el desarrollo de soluciones, tanto de orden tecnológico como conceptual, a necesidades que tiene la sociedad y que, desde la óptica de su corpus de conocimientos profesionales, pueden ser generales, sistemáticos, estables y extrapolables a otros contextos u otras situaciones [7]. Para llegar a las soluciones, el ingeniero debe analizar muy bien las causas que originan el problema de forma que pueda definir los recursos, las barreras, los requerimientos y las nuevas concepciones que se necesitan para que dicho problema sea resuelto [8].

La Ingeniería misma, la ciencia, la tecnología, las matemáticas, la estadística, la física, la química, la biología y la experimentación en diferentes campos, son insumos que posibilitan que el ingeniero cumpla con el compromiso profesional que implica su carrera. En la actualidad, el computador y sus productos asociados y derivados, constituyen una de las grandes herramientas para el ejercicio de la Ingeniería toda vez que posibilitan simular y hacer desarrollos *en frío* sin tener que intervenir ni alterar el entorno propio del problema que, muchas veces, es inalcanzable en términos prácticos y a nivel de experimentación.

En síntesis, el ingeniero con la mira en alcanzar la solución óptima de un problema, debe: administrar recursos; investigar caminos científicos; desarrollar nuevas posibilidades técnicas, conceptuales y tecnológicas; diseñar dispositivos, herramientas, aparatos y máquinas; construir y llegar a producir dichos derivados de su conocimiento; operarlos en los casos en que la operación de estas creaciones sean muy

especializados; saber valorar y llevar al mercado laboral su conocimiento y capacitarse a alto nivel tanto en los avances del saber disciplinar propio de su Ingeniería como en las nuevas formas de comunicación, acceso a las fuentes e interacción que se van derivando gracias al avance de las TIC.

A esto se le ha de sumar que el ingeniero, en tiempos de hoy, debe tener claro que cualquiera que sea la solución que haya diseñado para un problema específico de la sociedad, es prioritario la conservación de la vida así como la salud de las personas, el bienestar del ser humano y el cuidado sobre el medio ambiente pues ninguna problema se resuelve cuando se atenta con lo que la naturaleza provee o se intenta concederle bienestar al ser humano atentando contra su entorno [9].

Los programas de Ingeniería forman parte de la oferta académica de algunas universidades tanto públicas como privadas y que capacitan a los futuros ingenieros en los objetivos, propósitos y responsabilidades que se han explicado en los párrafos anteriores. Normalmente los programas de Ingeniería, en su concepción curricular, tienen una etapa de: 1) fundamentos y ciencias básicas, 2) conocimientos generales de ingeniería, 3) ingeniería aplicada, y 4) profundización por líneas o por temas. Cada universidad tiene la autonomía de establecer el perfil laboral y profesional para sus respectivos programas de Ingeniería y en diseñar un currículo (plan de estudio + actividades adicionales) que apunten al logro del perfil laboral y profesional.

La docencia puede definirse como la actividad que realiza una persona que se ha dedicado a enseñar y procurar caminos para que el conocimiento que enseña se convierta en nuevos aprendizajes para sus estudiantes [10], es el puente tripartito entre los propósitos institucionales, los conocimientos de la Ingeniería y los estudiantes que aspiran a ser ingenieros. La docencia es más que un trabajo o una labor, un apostolado que se debe ejercer con vocación. Esto invita a pensar en la necesidad de concientizar a los ingenieros docentes del papel que realizan dentro de la sociedad que no se remite, solamente, a dictar clases y cumplir con unos contenidos sino a construir sociedad a partir de procesos en los cuales comparte su información, sus conocimientos, su experiencia y, en algunos casos, su sabiduría tal que les compete ser ingenieros por su conocimiento y profesores por su vocación.

Los ingenieros docentes son una nueva arista que, recientemente, se ha fortalecido en los profesionales de la Ingeniería pues cada vez son más los que optan por la docencia como espacio para su ejercicio profesional en donde, deseablemente, deben llegar con experiencia luego de haber aplicado sus conocimientos y puesto en práctica soluciones que han resuelto problemas propios de su campo disciplinar [11].

La era que se ha enmarcado desde enero 2019 para el mundo, en los términos más literales posibles, es un cambio sustancial que ha permeado a todas las esferas de la sociedad y en donde la educación, las universidades y sus programas académicos, no han sido la excepción [12]. Se han tenido que adoptar medidas de confinamiento, aislamiento y distanciamiento que han cambiado la presencialidad por la virtualidad [13], intentando, sin lograrlo, equiparar todos los elementos que se involucran en la vida universitario pero, eso sí, convirtiéndose en un recurso muy útil para que la educación a nivel superior continúe su curso.

Si bien debe entenderse que las plataformas de comunicación grupal posibilitan la continuidad de las clases en unas condiciones diferentes pero con herramientas y recursos que la hacen realidad [14], también debe aceptarse que la universidad no es sólo el despliegue de las clases por parte de los profesores sino que incluye todos esos elementos que emergen cuando está presente el ser humano: calor humano, encuentros, descansos, conversaciones, diálogos y toda una serie de actividades que son las que configuran el encanto de la vida universitaria [15] y que se han debido dejar en stand-by mientras el mundo regresa a la normalidad académica desde la perspectiva presencial.

Esta situación, sui generis, deja de presente la necesidad de que los ingenieros docentes sean conscientes de que no sólo tienen un gran compromiso en la formación de los futuros ingenieros sino que deben tener claro que el mundo que hoy vivimos implica un cambio en la mentalidad tanto desde la Ingeniería como desde la Docencia y que solamente así se puede articular conocimiento, ingeniería, institucionalidad y profesionalismo para que los estudiantes de ingeniería puedan enfrentar los retos que les depara el inmediato futuro en el ejercicio de su profesión como ingenieros.

3. MÉTODO

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo ya que lo que se busca es comprender los retos que tienen los ingenieros docentes en tiempos de Covid-19 (tiempos cambiantes, en general) de cara a la sociedad del siglo XXI. Se ha acudido a algunas cuantificaciones solo para realizar las descripciones pertinentes dado que lo que se busca con lo cuantitativo es poder describir los fenómenos que se quieren estudiar en complemento a la comprensión que aporta lo cualitativo frente al mismo fenómeno.

Se indagaron a estudiantes, ingenieros docentes y directivos de diferentes programas de ingeniería en distintas universidades al respecto de cuáles consideraban que eran los retos que tienen en estos tiempos con tanto dinamismo, tantos cambios y tantas restricciones como las provocadas por la pandemia Covid-19 y teniendo en cuenta que, desde la Ingeniería, se enfrentarán los problemas de la sociedad actual en sus escenarios nuevos y emergentes.

Este levantamiento de información se realizó en el período comprendido entre el semestre I de 2020 (tiempo en el cual se adoptaron las restricciones derivadas de la pandemia Covid-19) y el semestre I de 2021, incluyéndolo, para un total de 3 semestres de análisis.

Toda la información se recolectó a través de medios virtuales (plataforma colectiva Google Meeting, servicios de correo electrónico y de WhatsApp) en comunicación directa, síncrona o asíncrona, con los profesores, los directivos y los estudiantes.

En algunos casos se adoptaron estrategias propias de la investigación cualitativa como la entrevista, el diálogo y el intercambio para esclarecer algunas opiniones que, en el instrumento de recolección de información, no estaban muy claras y, de esa forma, poder agruparlas para su respectivo análisis.

Para la recolección de información se acudió a instrumentos que se basaban en preguntas abiertas, tanto escritas como personalmente, y que posteriormente fueron analizadas en su sentido, agrupadas y cuantificadas teniendo en cuenta que el enfoque es cualitativo. La información se analizó desde la perspectiva del propósito mismo de la investigación a la luz de las herramientas que proveen la investigación cualitativa y dentro del marco de los modelos de análisis de las ciencias de la educación.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se la cantidad de estudiantes que participaron en la investigación es significativa si se mira desde la perspectiva de la población de estudiantes de I semestre asignatura Programación I de Ingeniería de Sistemas y Computación Universidad Tecnológica de Pereira constituyéndose en una proporción adecuada, como muestra, para inferir apropiadamente, y según los parámetros estadísticos, la confiabilidad de los resultados. Un análisis más amplio de esta tabla se presenta en el numeral de Análisis de Resultados.

Tabla 1. Personas participantes

Año	Sem	Estuds	Profesores	Administ
2020	I	42	18	7
	II	41	19	9
2021	I	43	17	7
Total		126	54	23

La Tabla 2 presenta una cuantificación de las respuestas de los de los estudiantes a la pregunta: *¿Cuál considera usted que es el principal reto de los ingenieros docentes en tiempos cambiantes como el período Covid-19 y de cara a la sociedad del siglo XXI?*

Se puede destacar que la comunicación con los estudiantes, por parte del profesor, constituye para ellos un factor de gran importancia puesto que se convierte no solamente en parte de la retroalimentación académica sino en la motivación que influye en los estudiantes para que adopten posturas proactivas y proclives hacia el aprendizaje.

Tabla 2. Opiniones cualitativas de estudiantes

No.	Opinión	Q	%
1	Tener mayor comunicación con los estudiantes	39	30
2	Ser un modelo a seguir como profesional y como persona	31	24
3	Moverse muy bien en el mundo de las TIC	25	19
4	Estar mejor capacitado como profesor	16	12
5	Que sepa muy bien lo que está enseñando	7	5
Total		118	90

La Tabla 3 presenta opiniones de ingenieros docentes en relación con la pregunta: *¿Cuál considera usted que es el principal reto de los ingenieros docentes en tiempos cambiantes como el período Covid-19 y de cara a la sociedad del siglo XXI?* desde la perspectiva que les provee su formación como ingenieros pero también su dedicación como profesores, ya que ambas son aristas de una misma realidad laboral y profesional que poco a poco ha ido tomando gran fortaleza y que el mundo de hoy requiere se lleven a la par para bien del desarrollo de la academia y de la formación superior.

Tabla 3. Opiniones cualitativas de ingenieros docentes

No.	Opinión	Q	%
1	Capacitarse mucho mejor como profesores	16	30
2	Manejar muy bien las herramientas y servicios TIC	14	26
3	Mantener comunicación activa con los estudiantes	10	19
4	Tener claridad entre evaluar y calificar	6	11
5	Realizar estudios de alto nivel en su disciplina	5	9
Total		51	95

No podría dejarse por fuera la opinión de los administrativos que, como protagonistas de las gestiones que posibilitan la academia, priorizan el aprovechamiento máximo de la infraestructura tecnológica como el principal reto que tienen los ingenieros docentes. En la Tabla 4 se observa las respuestas a la pregunta: *¿Cuál considera usted que es el principal reto de los ingenieros docentes en tiempos cambiantes como el período Covid-19 y de cara a la sociedad del siglo XXI?* Es apenas comprensible que sea esa su primera preocupación pues en la medida en que esto suceda y que los ingenieros docentes estén capacitados para capitalizar las bondades de la infraestructura tecnológica institucional, en esa medida se justificarán todas las inversiones que al respecto se hacen desde las instituciones de educación superior y las universidades en consonancia con las políticas y exigencias del Ministerio de Educación Nacional.

Tabla 4. Opiniones cualitativas de administrativos

No.	Opinión	Q	%
1	Aprovechar al máximo la infraestructura tecnológica	9	39
2	Tener buena comunicación con los estudiantes	5	22
3	Atender apropiadamente sus consultas	4	17
4	Saber muy bien de su área disciplinar	2	8
5	Estar disponible cuando el estudiante lo necesita	1	4
Total		21	90

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Lo primero que debe aclararse es que, para facilitar los análisis, se seleccionaron las 5 opiniones que tuvieron mayor frecuencia pues se consideraron como las más representativas para los análisis pertinentes. En la Tabla 1 se observa que se involucraron 126 estudiantes, 54 profesores y 23 administrativos de diferentes programas de Ingeniería que, en términos generales, provinieron de distintas universidades ubicadas mayormente en el Eje Cafetero, pero sin descartar opiniones que se obtuvieron de universidades de otras regiones. Aunque resulta obvio, se aclara que todas las universidades a las cuales se acudió, ofrecen programas de Ingeniería dentro de su oferta académica.

La Tabla 2 presenta las opiniones cualitativas de los estudiantes según las cuales, para los estudiantes entrevistados lo más importante (en proporción de un 30%) corresponde a la necesidad de que los ingenieros docentes tengan una mayor comunicación con los estudiantes. Según la ampliación de

respuestas realizadas en conversación directa, los estudiantes consideran que la comunicación implica tanto lo que pueda suceder de forma presencial y de forma directa como toda la interacción que se puede lograr a través de las herramientas y servicios TIC ya que corresponden a una parte de su lenguaje natural actual como es la tecnología. Seguidamente, los estudiantes privilegian la presencia del profesor como un modelo a seguir tanto en lo profesional como en lo personal, es decir, los estudiantes (según sus opiniones) consideran que el profesor sigue siendo un ejemplo a seguir y bien vale la pena tener en cuenta que no necesariamente así sucede para conveniencia de la formación de futuros ingenieros y para beneficio de la sociedad.

Conocer y utilizar muy bien las herramientas TIC es otra característica considerada importante para los estudiantes. Nótese que en los tres primeros puestos de opinión no se expone la necesidad de que el profesor sea un especialista en el conocimiento disciplinar que lo ubican, según las respuestas, en el quinto nivel. De la misma forma privilegian la capacitación como profesores pues consideran que un ingeniero docente debe tener tanto un buen conocimiento disciplinar como una buena preparación como profesores pues se forman como ingenieros, pero ejercen como profesores y son dos aristas que bien vale la pena fortalecer en bien del avance del conocimiento y de la formación de ingenieros de cara a las necesidades emergentes de la sociedad del siglo XXI.

En cuanto a la Tabla 3, que expone las opiniones cualitativas de los mismos ingenieros docentes, se evidencia que para ellos la formación como profesores es uno de los retos más grandes que tienen puesto que, si bien están capacitados profesionalmente como ingenieros, todo el despliegue del conocimiento se hace desde la perspectiva docente. De la misma forma, aceptan que el mundo TIC es una necesidad apropiarlo y asimilarlo desde la labor académica ya que ofrece una serie de herramientas y servicios que no sólo pueden ser de gran utilidad en el cumplimiento de sus funciones como profesor sino que forma parte del lenguaje natural de los jóvenes que podrán sentir a los profesores en su propio mundo lo cual podría generar, si se maneja apropiadamente, una motivación orientada al aprendizaje, según la opinión de los mismos ingenieros docentes.

En la Tabla 3 llama la atención la cuarta opinión, según la cual, para los profesores entrevistados se hace necesario llegar a tener mucha claridad en cuanto a la diferencia entre el concepto de *evaluar* el de *calificar* ya que la calificación es una valoración numérica por una actividad específica mientras que la evaluación es una valoración cualitativa en cuanto a lo que el estudiante avanza, apropia, aplica y asimila y es capaz de demostrarlo. La dificultad que manifiestan los ingenieros docentes radica en que consideran, en más de una oportunidad, que los dos conceptos son iguales y es allí en donde el gran perjudicado, a la luz de esta visión, es el estudiante. De otra parte, la evaluación prioriza lo que el estudiante aprende mientras que la calificación le da mucha más relevancia a lo que el estudiante obtiene como nota que son dos enfoques completamente diferentes frente a los objetivos propios de la labor docente. De todas formas, no se descarta la necesidad de que los ingenieros docentes tengan una capacitación a alto nivel en la disciplina propia pues no ha de descartarse que la docencia la ejercen sobre las temáticas específicas de la ingeniería, pero sin darle la prioridad que podría suponerse.

Por su parte la Tabla 4 expone las opiniones cualitativas de los administrativos de los programas de Ingeniería de las universidades consultadas en donde se refleja de manera natural que el principal reto que consideran dichos administrativos es el aprovechamiento de la infraestructura tecnológica pues, según sus opiniones ampliadas, son muchas las exigencias que la comunidad académica le exige a la administración de las universidades aunque éstas, cuando son resueltas, no se aprovechan en toda la plenitud. La tendencia actual a mejorar la capacidad tecnológica de las universidades, en la mayoría de los casos, no se articula con el aprovechamiento de la misma por más actualizados que estén. También los administrativos consideran que un cumplimiento vocacional de las funciones de los ingenieros docentes corresponde a la disposición, en todos los sentidos profesionales y académicos, que pueda tener frente a los estudiantes.

En el marco del presente proyecto de investigación se consultaron diferentes fuentes bibliográficas al respecto del tema y se encontró que los autores que lo han abordado tanto desde perspectivas prospectivas como estadísticas, consideran que los ingenieros docentes tienen tres retos grandes de cara a la formación de ingenieros para la sociedad del siglo XXI: 1) la alta capacitación tanto como ingenieros como profesores,

2) el conocimiento profundo y la apropiación de las TIC como canal de comunicación con sus estudiantes, y
3) la conciencia alrededor de la responsabilidad ética, social, medioambiental, académica y científica que les corresponde como formadores de ingenieros.

6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el propósito de este capítulo era el de presentar los resultados de una investigación cualitativa que parte del levantamiento de información con ingenieros docentes, administrativos y con estudiantes de forma que se puedan apropiar elementos de juicio que posibiliten la articulación de los hoy estudiantes de ingeniería desde la perspectiva de los retos que tienen los ingenieros docentes buscando que éstos tengan consciencia de ellos y los hagan efectivos en el marco de la actualización de los currículos de los programas de Ingeniería, puede decirse que la necesidad de fortalecer la comunicación (tanto comunicación presencial directa como a través de las TIC), la alta capacitación en docencia y en su campo disciplinar propio para ingenieros docentes y la adopción de estrategias que evidencien sus responsabilidades como formadores son los retos que el profesor debe asumir en unos tiempos, como los actuales, en donde las condiciones pueden cambiar de un día para otro y de cara a una sociedad que exige ingenieros con gran capacitación disciplinar pero con una calidad humana que permita articularse a las necesidades y escenarios del siglo XXI.

REFERENCIAS

- [1] M. Annanth, «Humanities and Engineering Education», 23 Marzo 2016. Recuperado: <http://www.t5eitm.org/2016/03/importance-humanities-engineering-education/>
- [2] E. A. Blackman, "La política pública frente al Covid-19", Buenos Aires: BID, 2020.
- [3] F. Diaz Barriga y G. Hernandez Rojas, "Estrategias docentes para un aprendizaje significativo", México: McGraw Hill, 2002.
- [4] J. Acosta Flores, "Ingeniería de Sistemas, un enfoque interdisciplinario", México: AlfaOmega Grupo Editorial, 2003.
- [5] A. Ansoms, "ReEngineering Society: The visions and ambitions of the Rwandan Elite," *African Affairs*, vol. 108, n° 431, pp. 289 - 309, Abril 2009.
- [6] M. Burrola Vasquez, Evaluación de las competencias básicas en TIC en docentes de educación superior en México, *Tesis Doctoral*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2015.
- [7] IESALC / Unesco, "Educación Superior y Sociedad", Washington: IESALC / Unesco, 2019.
- [8] O. I. Trejos Buritica, "Lógica de Programación", Bogotá: Ediciones de la U, 2017.
- [9] L. F. Bojalil, "La relación universidad sociedad y sus desafíos actuales," *Reencuentro*, pp. 11-18, 2008 núm 52.
- [10] A. Area Moreira, De la enseñanza presencial a la docencia digital, *RED REvista de Educación a Distancia*, n° 56, pp. 2 - 22, 31 01 2018.
- [11] Colby, "Educar Ingenieros", Bogotá: Ediciones de la U, 2017.
- [12] Cepal, "La educación en tiempos de la pandemia de Covid 19," Cepal Unesco, New York, 2020.
- [13] K. Schwab y T. Malleret, "Covid-19: the great reset", Zurich (Suiza): Agentur Schweiz, 2020.
- [14] M. Eady y L. Lockyer, "Tools for Learning: technology and teaching", Wollongong (Australia): University of Wollongong Press, 2013.
- [15] S. e. a. Castillo, "Reflexiones sobre la universidad y la sociedad," *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, vol. 2, pp. 444 - 454, 08 2016.

Diseño de un aplicativo para capturar señales bioeléctricas y encefalográficas en miembros superiores

Fabián David Barreto Sánchez¹

Nicolás Rodríguez Daza²

Cristian David Sánchez Bolaños³

Cesar Andrey Perdomo Charry⁴

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Colombia

La fisiología de los miembros superiores del ser humano contempla un complejo sistema de sensores y mecanismos biológicos, que logra realizar un agarre perfecto en diversas situaciones de la vida cotidiana. Por esto, la captura de las señales bioeléctricas provenientes de las acciones realizadas por el miembro superior sigue siendo un desafío en la ingeniería electrónica y en la bioingeniería. En este capítulo se presenta el desarrollo de un software que integra la captura de señales bioeléctricas, tales como señales electromiográficas EMG y señales encefalográficas EEG, al realizar un movimiento del miembro superior. Las herramientas tecnológicas utilizadas para la captura de estas señales son el brazalete myo@armband, desarrollada por Thalmic Labs (señales EMG), y la herramienta de captura Ultracortex Mark IV.^{EEG} Headset, desarrollada por OpenBci (señales EEG), la cual permite también asignar etiquetas a los movimientos realizados y capturados en cada sesión.

¹ Contacto: fbarretos@correo.udistrital.edu.co

² Contacto: nrodriguez@correo.udistrital.edu.co

³ Contacto: crdsanchezb@correo.udistrital.edu.co

⁴ Contacto: cperdomo@correo.udistrital.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La situación descrita en el informe mundial sobre la discapacidad de la Organización Mundial de la Salud OMS [1] revela que más de 200 millones de personas presentan discapacidades que limitan el desarrollo de actividades cotidianas. De igual forma, precisa que dichas limitaciones hacen que personas con discapacidad tengan peores resultados de salubridad, académicos, menor participación económica y tasas de pobreza más altas que las personas sin ninguna condición de discapacidad. A nivel global, la condición de discapacidad se considera como un problema de salud pública. Estamentos internacionales como la Asamblea Mundial de la Salud, la OMS y el Banco Mundial han propuesto normativas y políticas para facilitar el acceso a educación, salud y trabajo [2].

La necesidad de apoyar estas condiciones de discapacidad en los pacientes que la presentan, ha estimulado la creación de diferentes tecnologías en el reconocimiento de gestos del miembro superior, especialmente los gestos realizados por la mano, ya que esta representa cerca del 40 % de la funcionalidad del miembro superior [3]. La anatomía del cuerpo humano y en especial, las señales de ejecución de gestos con las manos se asocian con frecuencia a señales de origen eléctrico, químico o incluso acústico. Estas señales transmiten información que en algunos casos no se percibe de inmediato, y que debe ser decodificadas de alguna manera para encontrar interpretaciones significativas [4]. En la actualidad, se opta por sistemas de adquisición de señales bioeléctricas como las electromiográficas EMG y señales electroencefalográficas EEG para la discriminación de los gestos efectuados por el miembro superior.

El desarrollo de reconocimientos de patrones de señales electromiográficas superficiales, se considera un método que ha sido ampliamente utilizado para decodificar el movimiento de las extremidades y que en algunos casos se usan para producir señales de control de prótesis [5]. Estos métodos, generalmente requirieron de pacientes con un grado de amputación en sus miembros superiores para proporcionar una señal bioeléctrica viable proveniente de sus músculos residuales [6]. Estudios previos, han demostrado que pacientes con amputación de alto nivel o trastorno neuromuscular no cuentan con suficientes músculos residuales en las extremidades para proporcionar señales para la identificación precisa de gestos [7]. Tecnologías desarrolladas en los últimos 20 años de investigación en el área de Brain-Computer-Interface BCI, se han vuelto más interesante para la comunidad de investigadores. Desde su definición relativamente amplia a principios de 1970 [8], hasta las últimas décadas donde se ha visto el desarrollo de aplicaciones BCI que se centran fuertemente en proporcionar nuevos canales de comunicación y control para personas en condición de discapacidad [9].

Este artículo de investigación expone el desarrollo de un software que permite integrar las señales bioeléctricas (electromiográficas y electroencefalográficas), facilitando el etiquetado de movimientos y la creación de conjunto de datos. Lo anterior, es útil para el desarrollo de modelos posteriores enfocados en la identificación de gestos. Fue necesario implementar pruebas de sincronización con los dispositivos de adquisición de señales, como la myo@armband [10] para la adquisición de las señales EMG, junto a la herramienta de captura Ultracortex Mark IV.^{EEG} Headset [11] para la adquisición de las señales EEG.

2. MÉTODO

La apropiación de las herramientas de adquisición de datos es indispensable para el desarrollo del software que favorecen la conectividad entre las herramientas y el ordenador. En esta medida, es necesario analizar los dispositivos involucrados en la transmisión de datos. Dicha conexión se realiza haciendo uso de tecnología Bluetooth Low Energy BLE entre los dispositivos de adquisición y el ordenador. La captura de las señales se realiza en tiempo real, permitiendo la visualización y el almacenamiento de las mismas en archivos de formato separado por comas (.csv). La Figura 1 muestra el diagrama general del software desarrollado.

Con el propósito de generar una descripción de la arquitectura del sistema con los aspectos más importantes que la rodean, se desarrolla un diagrama de casos de usos, seguida de una tabla de requisitos funcionales y los diagramas de lenguaje unificado de modelado UML de las clases involucradas.



Figura 1. Diagrama general del software

2.1 Diagrama de casos de uso

En el diagrama de casos de uso se muestra en la Figura 2. Allí se realiza una descripción gráfica de las acciones del software desde el punto de vista del usuario. A través de esta descripción se facilita el modelado de la funcionalidad del sistema usando al usuario como actor y los casos de uso que representan las funciones provistas por el software.

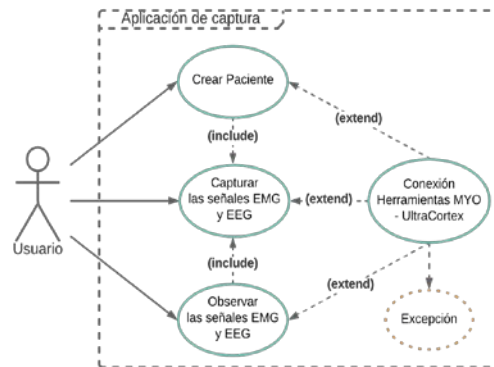


Figura 2. Diagrama casos de uso del software

2.2 Lista de requisitos

En la Tabla 1, se presenta los requisitos funcionales divididos en requisitos funcionales y no funcionales. Los requisitos funcionales especifican los servicios que provee el software por medio de una descripción concreta. Estos se clasifican en tres niveles de prioridad, alta, media y baja, ordenados de mayor a menor.

Tabla 1. Topología del clasificador utilizado

ID	Descripción	Prioridad
Req000	El software debe permitir crear la información básica de cada usuario necesaria para almacenar las capturas de las señales bioeléctricas.	Alta
Req001	El software debe crear una sesión de captura de datos diferente cada vez que se realice un inicio de sesión	Alta
Req002	El software debe permitirle al usuario ingresar el número en segundos de captura de las señales bioeléctricas.	Alta
Req003	El software debe Iniciar la conexión entre las herramientas myo y UltraCortex y el sistema, si no se puede realizar la conexión debe avisar al usuario	Alta
Req004	El software debe generar una carpeta para cada usuario del estudio, esta carpeta a su vez contiene dos carpetas para cada herramienta de captura y en ella crear un archivo .csv por sesión registrada.	Alta
Req005	El software debe mostrar en tiempo real las señales bioeléctricas durante la captura de la señal.	Alta
Req006	El software debe generar un sonido en el segundo 2 de la captura de la señal para informar al usuario que efectúe el gesto.	Alta
Req007	El software debe guardar los datos de cada herramienta en el archivo .csv al finalizar la captura.	Alta
Req008	El software debe registrar automáticamente la fecha y la hora de la captura de cada sesión.	Alta
Req009	El software debe permitir realizar o no el filtrado + a las señales capturadas desde las herramientas.	Media
Req010	El software debe mantener el registro del usuario localmente, aunque se cierre el aplicativo.	Media
Req011	El software debe permitir graficar al terminar la captura la última sesión capturada.	Media
Req012	El software debe permitir interactuar con la última gráfica capturada del usuario.	Media
Req013	El software debe mostrar las gráficas en cualquier navegador por librería utilizada con el lenguaje.	Baja

A continuación, se especifican la lista de requisitos no funcionales, correspondientes a los requisitos necesarios para el desarrollo del software:

- Versión del sistema operativo: Windows 10 y MacOs Mojave
- Lenguaje de Programación: Python 3
- Entorno de Programación: Visual Studio Code (Back End y Front End) Modelado de Problemas: Draw.io

2.3 Diagrama de clases

Una vez establecido la relación entre los casos de usos y los requisitos, se realiza el diagrama de clases que permite obtener el diagrama principal de diseño y análisis del sistema. La estructura de clases del software se especifica con relaciones entre clases y estructuras de herencia. Durante el análisis del sistema, el diagrama es desarrollado con el objetivo de encontrar una solución ideal.

Durante el diseño, se hace uso del mismo diagrama, modificándole para satisfacer los detalles de las implementaciones. En este caso, se obtuvieron dos estructuras o Frames por separado, el primer Frame para la captura de datos del usuario y un segundo Frame de captura de las señales bioeléctricas:

1. En la clase Ui_Datos_Paciente se encuentran definidos las funcionalidades o métodos, que ejecutan la captura básica de los datos de los usuarios a los que se le que realizan el estudio, se crea un archivo de texto con la información básica del usuario, de igual forma cuenta con un método para la creación de un directorio donde se almacenan los archivos .csv de las señales capturadas, este directorio se nombra con un consecutivo, se establece la siguiente codificación "Paciente_ID_001". También cuenta con un método que muestra el consentimiento informado al usuario (Figura 3).

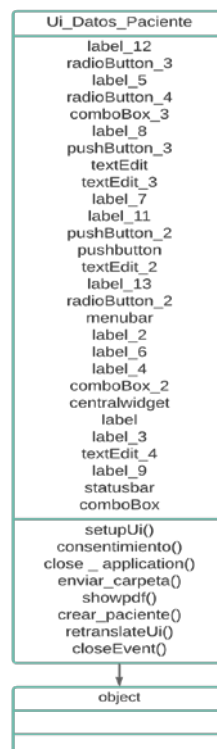


Figura 3. Diagrama de clase Ui_Datos_Paciente

2. En la clase Ui_MainWindow se encuentran definidas las funcionalidades del software, como lo son los métodos que inician la conexión entre las herramientas de captura myo y UltraCortex. Un método que crea (dentro del directorio del usuario creado en la clase anterior) los subdirectorios con el nombre del gesto seleccionado para la captura, dentro del cual se crean los archivos de extensión .csv para almacenar los datos de las capturas. Se define los métodos para llevar el control de timmer de la captura ingresado previamente por el usuario.

Además, se definen el método que se encarga de guardar los datos capturados y el método que realiza una alerta sonora para indicar la ejecución del gesto. Finalmente, presenta los métodos que se encarga de actualizar las señales en tiempo real y la gráfica de la última sesión realizada por el usuario (Figura 4).

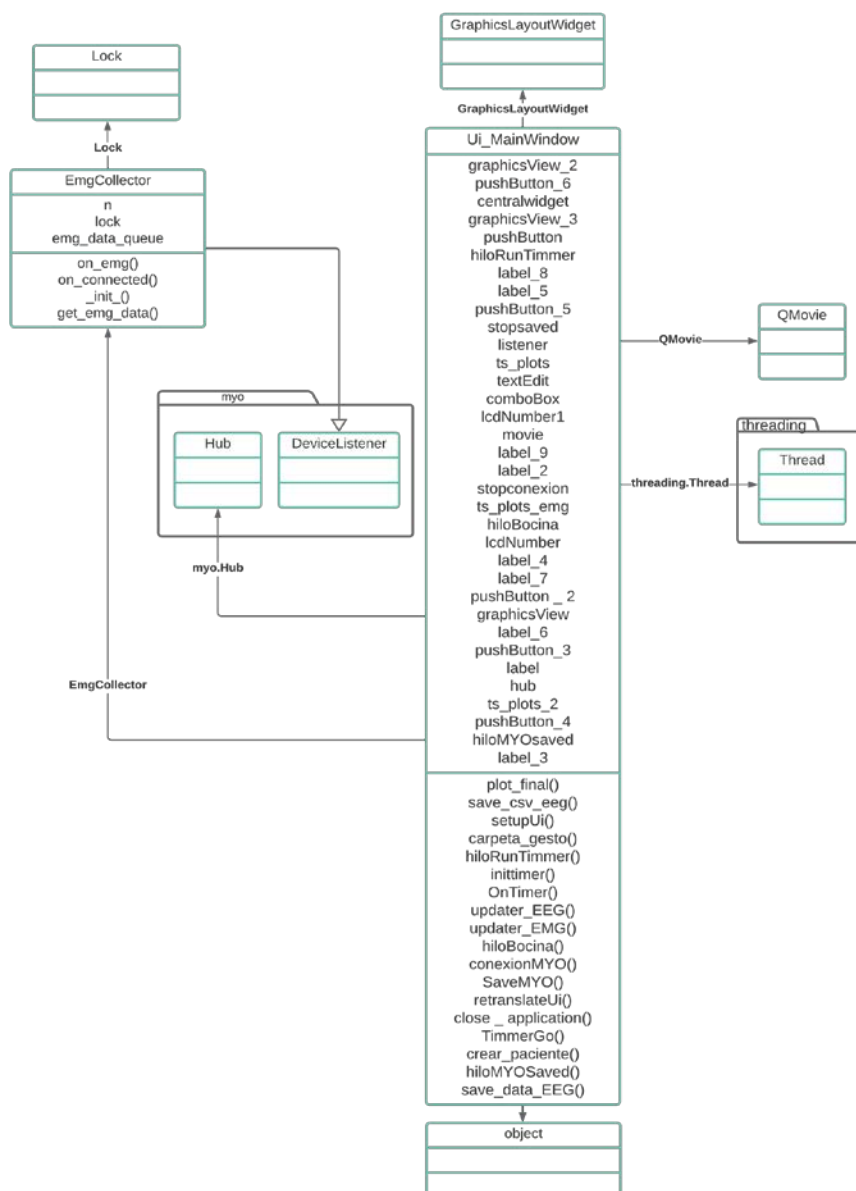


Figura 4. Diagrama de clase Ui_MainWindow

2.4 Creación del conjunto de datos

Para la construcción del conjunto de datos con las capturas de las señales EEG y EMG se establece una estructura de datos y archivos definidos de la siguiente forma: un directorio padre por cada usuario que participe en el estudio con la etiqueta "Paciente_n", donde n es un número secuencial interno dado por el software.

En este directorio se crea un nuevo directorio por cada uno de los movimientos o gestos realizados en la sesión, este directorio es nombrado "Gesto_n", donde n es un número secuencial interno dado por el software. Además, se crea un archivo con extensión ".txt", el cual recolecta la información relevante capturada por la clase Ui_Datos_paciente.

En cada uno de los directorios de los gestos, se crean dos directorios adicionales (uno para la myo y el otro para el Ultracortex IV) los cuales contienen los datos adquiridos por cada herramienta en archivos con extensión .csv, uno por cada sesión realizada. En la Figura 5 se expone la distribución de los datos para cada usuario.

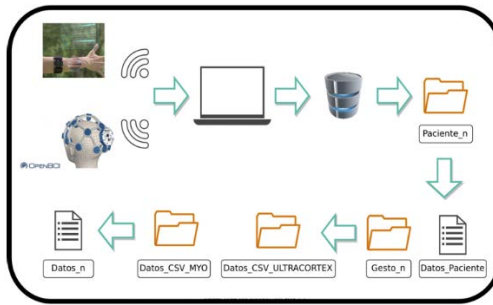


Figura 5. Diagrama de distribución de datos capturados

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan las capturas obtenidas dentro del software desarrollado y se expone el funcionamiento mediante diagramas de bloques de cada módulo que integra los Frame. En la Figura 6 se presenta la ventana principal al ejecutarse en donde se observan en tiempo real las señales adquiridas de los dispositivos, esta ventana contiene todos los módulos que interactúan con el usuario.

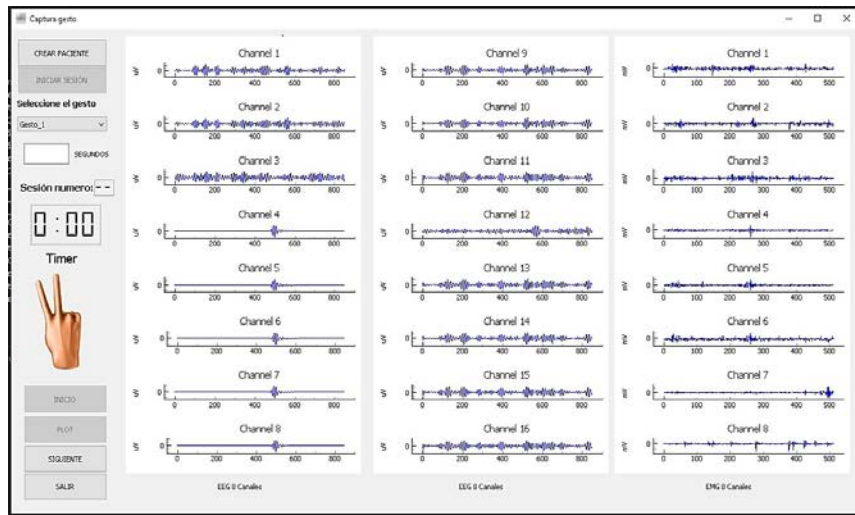


Figura 6. Captura de la pantalla principal del software

Al iniciar el software, el primer módulo en ejecutarse es el botón CREAR PACIENTE, el cual realiza la apertura de un segundo Frame que permite ingresar los datos relevantes para estudio del usuario (Figuras 7).

Figura 7. Pantalla de ingreso de datos del paciente

La Figura 8 expone el funcionamiento del software realizando la captura de las señales EEG y EMG al momento de realizar un movimiento de presión circular con el gesto trípode.



Figura 8. Pruebas de captura usando el software

En la Figura 9, se muestra el diagrama de flujo que el software realiza para la creación de un usuario nuevo en las capturas de señales EMG y EEG.

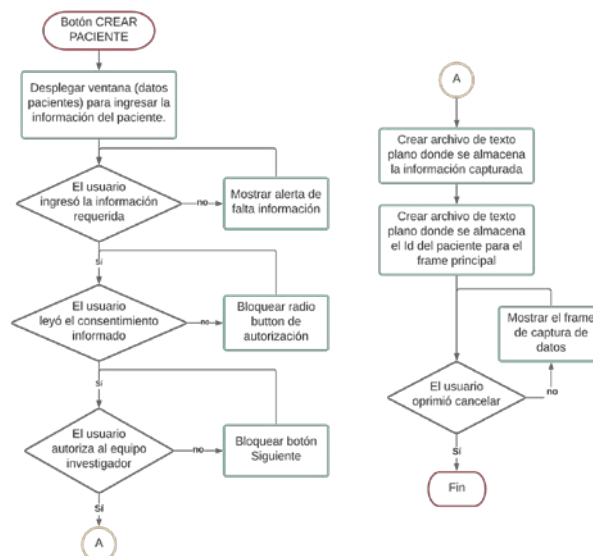


Figura 9. Diagrama de flujo del botón CREAR PACIENTE

El segundo módulo en desarrollo es el principal que se encarga de realizar la conexión de las herramientas de captura de datos. La Figura 10 muestra el diagrama de flujo del módulo de conexión a herramientas.

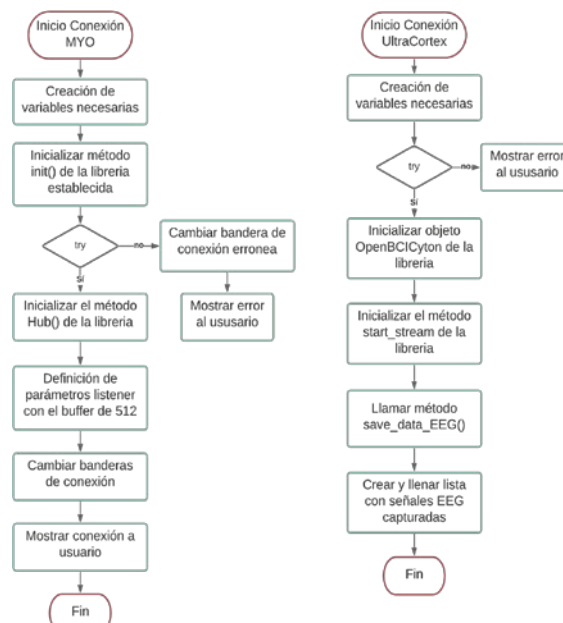


Figura 10. Diagrama de flujo de las conexiones myo y UltraCortex

El tercer módulo del software, consiste en realizar las gráficas en tiempo real de las señales provenientes de las herramientas de captura, la Figura 11 muestra el diagrama de flujo de este módulo.

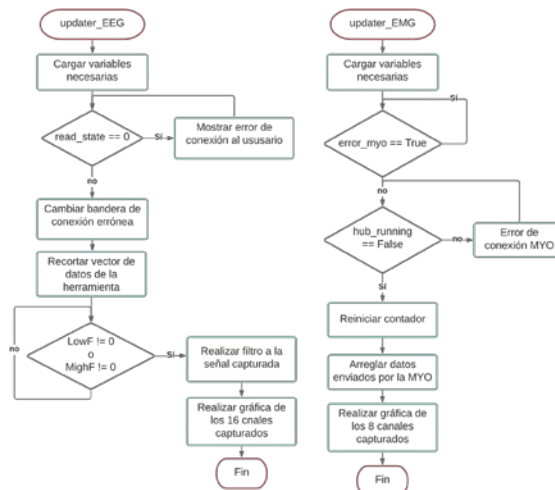


Figura 11. Diagrama de flujo de los métodos de plot de las dos herramientas de captura

Al realizar la conexión de las herramientas y las gráficas de ellas se debe presionar por parte del usuario el botón INICIAR SESIÓN, esto permite que el software se encuentre listo para la captura de datos. La Figura 12 muestra el funcionamiento de este botón.

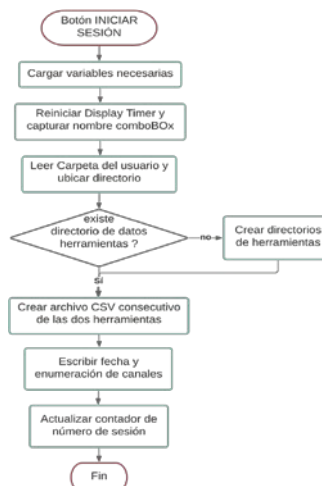


Figura 12. Diagrama de flujo del botón INICIAR SESIÓN

Posterior al presionar el botón INICIAR SESIÓN se debe seleccionar el gesto a capturar e ingresar el número de segundos a capturar las señales bioeléctricas, al realizar esto se presiona el botón INICIO para dar inicio a la captura de datos, las Figura 13 y Figura 14 muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del botón INICIO.

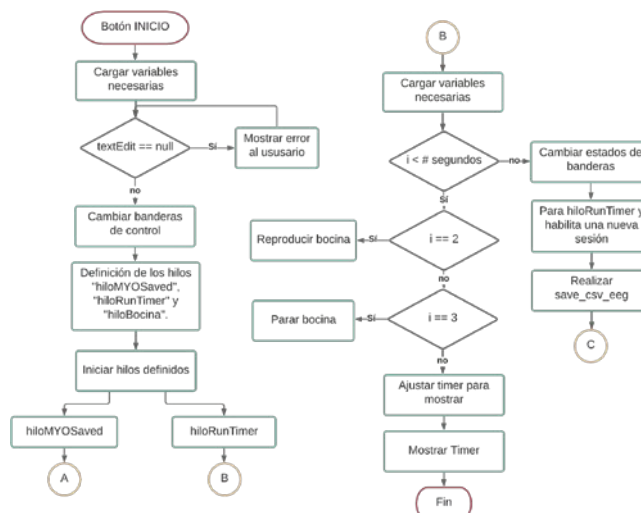


Figura 13. Diagrama de flujo del botón INICIO primera parte

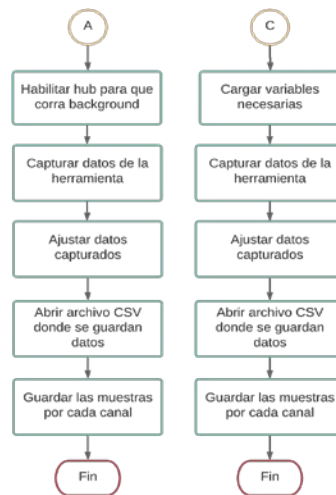


Figura 14. Diagrama de flujo del botón INICIO segunda parte

Finalmente, el software tiene un botón PLOT, el cual, cuenta con la funcionalidad para graficar las dos señales capturadas en esa sesión, la Figura 15 muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del botón.

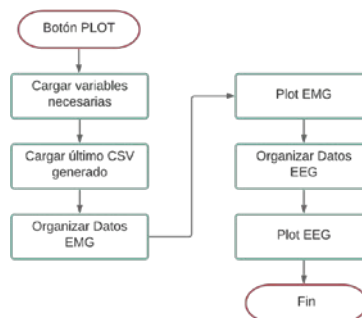


Figura 15. Diagrama de flujo del botón PLOT

4. CONCLUSIONES

Se generó un software que facilita la adquisición y captura de señales EMG con la herramienta myo @armband y la herramienta Ultracortex Mark IV. EEG Headset. Este software permite de una forma intuitiva y sencilla el visualizar, organizar y manipular los datos puros obtenidos durante una sesión de captura. Además, este software desarrollado brinda una opción para la creación del conjunto de datos etiquetados con gestos en cada sesión.

En la fase de pruebas de captura de señales bioeléctricas realizadas con algunos movimientos del miembro superior, se pudo evidenciar la predominancia en valores máximos, mínimos y promedio de canales de datos, demostrando las diferencias en amplitud entre estos.

Se determinó y comprobó que algunas variables externas (como volumen de cabello, diámetro de la cabeza, entre otras) para la herramienta Ultracortex, no traen consigo cambios considerables en los potenciales bioeléctricos EEG. También se pudo observar la ventaja de estas señales para la detección de eventos oculares que permitirá el desarrollo de algunos modelos de control de dispositivos electrónicos a personas con movilidad reducida y de esta forma depender de sí mismos para actividades cotidianas.

Este software permite facilitar el establecer y caracterizar los principales componentes de las dos señales relacionadas, con la extracción de información importante se inician diferentes estudios que brinden soluciones a personas en condición de discapacidad.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud. "Informe Mundial Sobre la Discapacidad". Organización Mundial de la Salud, 2011.

- [2] Moreno, Gómez Aristizábal LY, Avella Tolosa, and Morales LA. Observatorio de discapacidad de Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 33:277–285, 08 2015.
- [3] Brito, Jofre L. Quinde, Marlon X. Cuzco, David Calle, and John I. Estudio del estado del arte de las prótesis de mano. *Revista Ingenius*, 98, jun 2013.
- [4] L. Sörnmo and P. Laguna. *Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications*. Academic Press series in biomedical engineering. *Elsevier Science*, 2005.
- [5] Daniel Gutierrez y Oscar Castillo Roberto Sepúlveda Oscar Montiel, Gerardo Díaz. Classification of Encephalographic Signals using Artificial Neural Networks. *Computación y Sistemas*, 19:69 – 88, 03 2015.
- [6] Shota Hagio, Mizuho Fukuda, and Motoki Kouzaki. Identification of muscle synergies associated with gait transition in humans. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:48, 2015.
- [7] W. Samuel, X. Li, Y. Geng, P. Feng, S. Chen, and G. Li. Motor imagery classification of upper limb movements based on spectral domain features of eeg patterns. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 2976–2979, July 2017.
- [8] J J Vidal. Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1):157–180, 1973. PMID: 4583653.
- [9] Jonathan R. Wolpaw, Niels Birbaumer, Dennis J. McFarland, Gert Pfurtscheller, and Theresa M. Vaughan. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6):767– 791, Jun 2002.
- [10] Thalmic Labs. Myo blog, for people building the future with myo. 2021. Recuperado: <https://developerblog.myo.com/>
- [11] OpenBCI. Openbci open source biosensing tools (eeg,emg,ekg, and more. 2021. Recuperado: <https://openbci.com/>

Implementación de gráficos de control sintéticos para el análisis estadístico de los datos en la HAS-200 mediante el desarrollo de un software

Gustavo Andrés Campos-Avenidaño¹

Astrid Carolina Lezama Merizalde²

Ángel Felipe Rueda Molano³

Gloria Stefanny Rubiano Vega⁴

Fundación Universitaria Konrad Lorenz
Bogotá

Con el tiempo, los procesos industriales han aumentado en complejidad debido a las exigencias de los consumidores en el cumplimiento de las especificaciones de los productos; por tal razón, ha sido indispensable la inspección de la calidad no solo en la última etapa de la cadena de valor sino también en el área de fabricación a través de un control estadístico que permite analizar, investigar y evaluar posibles anomalías, monitorizando mediante un conjunto de gráficos de control, también conocidos como gráficos de Shewhart. La finalidad de esta propuesta consiste en presentar una investigación sobre los gráficos de control sintéticos, herramientas útiles de calidad que permiten conocer las causas de alguna variabilidad existente en un proceso. Se comprobó la posibilidad de combinar un gráfico por variables con un gráfico por atributos para monitorizar con un 100% de inspección los datos y así obtener una mayor efectividad al momento de detectar el grado de heterogeneidad existente en el proceso. La experimentación se aplica en el sistema HAS-200 que reproduce un proceso productivo con alto nivel de automatización, con este desarrollo se evaluaron dos variables: altura y peso. Al aplicar los gráficos sintéticos por medio de un software desarrollado se evidenció que el gráfico sintético X-RL2 y el gráfico sintético CRL son más eficientes a comparación del gráfico X pero la implementación de aquellos es situacional y se debe comparar los valores del ARL para saber cuál es el óptimo a usar, además se observó que el proceso está produciendo más peso del valor objetivo, debido a una posible falta de calibración de la HAS-200, como otros factores que causan la producción fuera de control respecto a los límites hallados por medio del software.

¹ Contacto: gustavo.campos@konradlorenz.edu.co

² Contacto: astridc.lezamam@konradlorenz.edu.co

³ Contacto: angelf.ruedam@konradlorenz.edu.co

⁴ Contacto: glorias.rubianov@konradlorenz.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los gráficos estadísticos son herramientas útiles, haciendo énfasis en el ámbito industrial el cual nos permite controlar y medir el comportamiento de los productos dentro de un proceso de producción, donde se determinan parámetros de calidad, dicho termino se define *como el conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas* [1]. Por lo tanto, para llegar al control de calidad se implementa técnicas estadísticas.

Con las técnicas estadísticas que se hablarán en esta investigación se pretende obtener un control estadístico eficiente y una visualización comprensible, por tanto, se hace uso de los gráficos de control cuyo objetivo es el entendimiento tanto visual como conceptual de las variables del producto detectando y anticipando desajustes en el proceso estudiado para mitigar la producción de productos defectuosos [2]. Por consiguiente, esta investigación está encaminada a la implementación de los gráficos sintéticos, los cuales están compuestos por dos gráficos de control, siendo derivado de gráficos de control por atributos y otros por variables, debido a que el gráfico de control X presenta escaso desempeño a la hora de detectar cambios pequeños del valor objetivo.

Por otro lado, los gráficos sintéticos que se estudiaron es la combinación del gráfico de control X junto con el CRL, para su respectiva generación, además la investigación está encaminada a optimizar dicho grafico sintético con la combinación del gráfico de control X combinándolo con un gráfico por atributos propuesto en literaturas anteriores denominado RL2 [3], sin embargo, es teórica y se quiere implementar de forma empírica para relacionar nuestros resultados y sacar sus respectivos análisis de la eficiencia de las gráficas.

Finalmente, la investigación se llevara a cabo con una revisión bibliográfica y conceptual del desarrollo de los gráficos de control como su funcionalidad, luego con la información recopilada y estructurada se continua a una fase empírica con el sistema automatizado HAS-200, siendo una herramienta de laboratorio que permite simular una cadena de procesos de forma pedagógica, no obstante, está conformada por estaciones de producción, donde se hará foco en la estación de control de calidad ya que permite extraer los datos para analizar, siendo la altura y el peso.

2. MARCO CONCEPTUAL

El *Control Estadístico de Procesos* nació a finales de los años 20 en los *Bell Laboratories*. Su creador fue Walter Shewhart, quien en su libro *Economic Control of Quality of Manufactured Products* (1931) marcó la pauta que seguirían otros discípulos distinguidos. Shewhart identificó dos causas posibles de variaciones en un proceso: causas asignables y causas aleatorias. Basándose en esta identificación, desarrolló una gráfica de control que permitiera distinguir las dos posibles causas de variaciones. La gráfica desarrollada por Shewhart fue posteriormente perfeccionada por Edwards Deming y Joseph Juran [4].

Tras los resultados del método de control desarrollado por Shewhart, Deming y Juran, este método se extendió en industrias utilizando procesos productivos en serie, como la automoción, la aeronáutica, y las industrias médicas y de telecomunicaciones. Más allá de gráficos de control, estos tres ingenieros desarrollaron unas pautas de actuación que permite prevenir los fallos y eliminarlos. Existen diferentes tipos de gráficos, los principales son: variables y atributos.

Los gráficos de control permiten monitorizar la media y la desviación estándar mediante la combinación de ciertos gráficos como, por ejemplo: el gráfico de control X de Shewhart es utilizado para controlar la media, si se desea detectar cambios en el proceso de una manera más rápida se acompaña con el gráfico (CRL). Es importante tener en cuenta que, para poder implementar el gráfico mencionado anteriormente, se debe establecer los límites de control superior e inferior:

- Si la muestra se mantiene dentro de los límites de control se considera que el proceso sigue bajo control y la muestra es conforme.
- Si la muestra se encuentra por fuera de los límites de control se considera que el proceso es no conforme, para este caso se contabiliza el número de muestras hasta la siguiente no conformidad [5].

En esta investigación, se profundizará dos gráficos de control, en el cual, integra variables con atributos. Es importante identificar que la palabra sintético denota la idea de usar dos gráficos diferentes combinados, donde uno es el gráfico X que permite monitorear la estabilidad de la media (valor de tendencia central), los otros corresponden a gráficos por atributos: CRL y RL2.

2.1 Gráfico X

En algunos casos, es necesario realizar gráficos de control donde el tamaño de la muestra es 1, es decir, mediciones individuales. Al ser la muestra unitaria, no resulta posible calcular la variabilidad dentro de la misma. Para resolver esto, se hace una agrupación artificial de cada elemento con el siguiente, de manera que se asocia la variación entre dos unidades consecutivas ($k = 1,2$) a la variación intermuestral. Esta variación se estima a través del rango móvil (MR). Los límites de control para el Gráfico X se obtienen a través de las ecuaciones (1) y (2) [9].

$$LSC = LC + \left(3 \frac{\overline{MR}}{d_2}\right) \quad (1)$$

$$LIC = LC - \left(3 \frac{\overline{MR}}{d_2}\right) \quad (2)$$

Donde:

LC : Límite de Control Central

\overline{MR} : Rango móvil

d_2 : Factor para línea central (1.128) según tabla de constantes para gráficos de control

2.2 Gráfico de control sintético: X - CRL

El gráfico de longitud de ejecución conforme CRL, propuesto por Bourke, se desarrolló originalmente para el control de calidad de atributos y fue estudiado recientemente por otros investigadores. Es un gráfico por atributos que monitoriza con 100% de inspección y consiste en el conteo de unidades inspeccionadas entre dos disconformidades que incluyen la última unidad no conforme. El gráfico de control sintético X - CRL fue desarrollado por Wu y Spedding en 2001, el cual consiste en el uso simultaneo de un gráfico Shewhart y un gráfico por atributos. Este es usado para monitorizar la media de un proceso y trabaja de la misma forma que un gráfico CRL, con la consideración que cada unidad de inspección en el último gráfico mencionado se debe sustituir en el gráfico X por medio de la media muestral [6].

2.3 Gráfico de control sintético: X - RL2

El gráfico de control X-RL2 consiste en la utilización conjunta de un subgráfico X de Shewhart y uno de RL2, siendo éste último diseñado para detectar incrementos en la probabilidad de que una muestra sea no conforme. Para el diseño del gráfico se asume una distribución normal de datos del proceso; además, la media y la desviación del proceso bajo control se suponen que son conocidos. Desde el inicio del control del proceso en el subgráfico X se contabiliza el número de muestras hasta que se detecte la segunda muestra no conforme; así, el primer estadístico es obtenido y es plasmado en el RL2.

Para la obtención de un segundo estadístico se inicia el conteo de muestras en el subgráfico X desde la primera muestra no conforme obtenida hasta la tercera, de igual manera es llevado el valor RL2. Así sucesivamente se obtienen los demás valores de los estadísticos para el subgráfico. En el momento en el que el valor de un estadístico del RL2 es menor que el límite de control L se considera que existe una salida de control en el proceso [3].

2.4 Obtención del ARL

El ARL es considerado como la cantidad de muestras necesarias que en promedio se deben analizar hasta detectar un cambio en el proceso. Para el diseño de un gráfico de control se debe establecer un ARL bajo control deseado; es decir, un ARL cuando se supone que el proceso no ha sufrido cambios. Para la obtención

de los límites de control es necesario tener en cuenta que estos han de estar condicionados a dicho ARL bajo control. En el momento que se produzca un cambio en el proceso es imperativo adquirir valores de ARL fuera de control para el gráfico que se desea desarrollar y así establecer su desempeño; para ello son imprescindibles los valores de los límites de control y del ARL bajo control [7]. Según lo evidenciado anteriormente, se puede detectar que los gráficos permiten realizar pequeñas y grandes mejoras en uno o más procesos en varias organizaciones, es decir, trata básicamente de informarnos sobre la estabilidad y variabilidad de un proceso, generalmente aplicado en procesos de fabricación, de ahí su importancia de las diferentes industrias.

2.5 Sistema automatizado HAS-200

El sistema automatizado HAS-200 es una herramienta de práctica de laboratorio que emula el funcionamiento de una fábrica real con una variedad de procesos productivos, el cual su referencia compone diferentes estaciones que tienen usos específicos, por otro lado, su principal producto que genera son envases que contienen por dentro polímeros o también se conocen como pellets de 15, 30 a 45 g.

Una vez llenados con la cantidad correspondiente, a los recipientes se les coloca una tapa. Después el producto se envía a la estación de expediciones o a los almacenes en espera de ser despachados. Dentro del proceso, se mide tanto el peso del material como la altura. Estas dos variables son analizadas en esta propuesta de investigación por medio de la generación de datos para evaluarlos en el software estadístico diseñado y así tomar decisiones frente a la situación ideal esperada con respecto al comportamiento actual de los datos. La HAS-200 está compuesta por las siguientes estaciones:

1. *Almacenaje*: Se deposita los botes y los pellets (polímeros) en dos estaciones según el color, en este módulo se mide la altura de la materia prima contenida en cada recipiente mediante un cilindro vertical que detiene el bote para permitir la medida. Luego se mide el peso del recipiente junto con el contenido de los pellets por medio de una balanza.
2. *Calidad*: La estación disponen de un tramo de cinta adicional que hace las funciones de *buffer*, liberando el tráfico de la cinta principal. Dos cilindros controlan el paso de los recipientes, en este módulo, también se expulsan los recipientes considerados erróneos.
3. *Alimentación de tapas*: Un alimentador de dos columnas almacena las tapas, que son extraídas por medio de un cilindro neumático.
4. *Almacenaje*: Este sistema está compuesto por dos ejes eléctricos que permiten un posicionamiento preciso en las celdas del almacén.
5. *Rampa de expedición*: Los dos carriles de la plataforma permiten que se puedan ir almacenando recipientes organizados en dos lotes distintos. Mediante un mecanismo que realiza la función de rampa, los recipientes se van situando uno tras otros, terminando el ciclo del proceso.

HAS-200 cubre el cuarto nivel en la pirámide de automatización como se observa en la Figura 1, incorporándose en el nivel ERP para la introducción de los pedidos de fabricación, es decir, donde se ejecuta todas las actividades relacionadas con la idea de negocio en una compañía industrial, permitiendo comunicar distintas áreas. A continuación, se evidenciará los 5 niveles de la pirámide de automatización y la forma como se integran todas las tecnologías presentes en la industria:

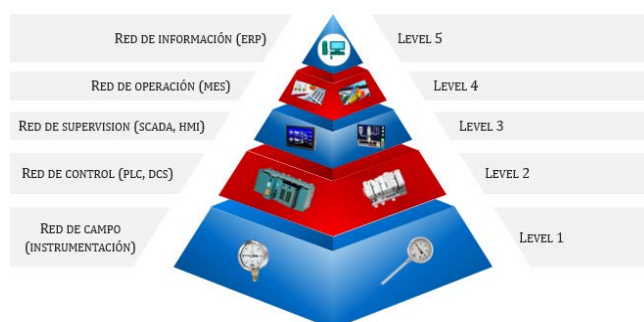


Figura 1. Pirámide de automatización

3. MÉTODO

3.1 Diseño del Software

KL CONTROL CHART es un software desarrollado bajo la plataforma Angular, que maneja el lenguaje denominado Typescript, además de contar con un diseño estilo Dashboard proporcionado por material y bootstrap que dan al usuario una experiencia más amena y de fácil acceso. Contiene 3 Módulos principales, cada uno soportado por un servicio siendo así un software compacto y con una gran velocidad de respuesta.

Dentro de los módulos mencionados anteriormente todos se componen de una vista con su respectivo diseño en html y soportado en bootstrap, contienen un checkbox que permite al usuario decidir el ingreso o cálculo de la media, además realizar los gráficos, conteo de las muestras totales y las muestras que se encuentran fuera de los límites; posteriormente si el usuario así lo quiere se puede generar un reporte con cada uno de los datos y un pequeño análisis general de los resultados encontrados.

Ya específicamente los módulos de Gráfico X CRL y RL2, permiten la selección de la magnitud de cambio de 0.1 a 3 para así hacer automáticamente los cálculos y selección de los límites y constantes a utilizar, para posteriormente ser graficados; al igual que con el Gráfico X para cada una de las gráficas se genera un conteo de las muestras totales y las muestras por fuera, finalmente se presenta sus respectivos reportes y análisis.

A continuación, se evidencia en la Figura 2 los componentes de la presentación de la interfaz del Software en una forma menos detallada y de manera general.



Figura 2. Interfaz del Software

3.2 Producción en la HAS-200

Se realizó por medio del sistema de HAS-200 una producción de 165 contenedores, el cual su producción se hizo en un solo momento sin pausas, por lo tanto, durante la cadena de procesos solo se usó una estación de producción y se omite la estación de inventario. La finalidad de esta producción tiene como objetivo analizar el comportamiento de las variables altura y peso, entonces la hipótesis inicial que se tiene es que su distribución es normal, gracias a las estaciones de calidad se obtienen los datos para poder implementar de forma empírica con el software y la teoría de los gráficos sintéticos.

El procedimiento consiste en ordenar en el sistema la generación de aquellos envases, el cual en este estudio producen solamente productos con un relleno de polímeros de 15 g; entonces el producto empieza en la primera estación encargada de llenar los envases, consecuentemente para su llenado se hace por medio de tolvas y automáticamente llena el contenido, paralelamente debajo del contenido como se observa en la Figura 3 nos encontramos con nuestra primera toma de datos por medio de las balanzas el cual extrae la información del peso.



Figura 3. Estación de producción

Luego cuando esté lleno el contenedor pasa por la siguiente estación denominada control de calidad, el cual su mismo nombre lo dice hace un chequeo de la segunda variable que se evaluara siendo la altura, por medio de un colchón se inserta dentro del contenedor para hallar la altura que alcanza a descender, acto seguido se desplaza a la siguiente estación denominada tapado, cuyo objetivo es tapar los envases aprobados por la estación de calidad. Por último, los envases se trasladan por una estación de inventario, sin embargo, esta no se usa para la investigación, por lo tanto, se da el paso libre sin almacenar para la última estación denominada despacho, el cual consiste en despachar los productos terminados fuera de la cadena de proceso y el producto final quedaría como en la Figura 4.



Figura 4. Producto final

3.3 Determinación y optimización de los límites de los gráficos

Los límites de los gráficos sintéticos son esenciales para poder evaluar los puntos fuera de control y este varía dependiendo de la desviación como el tamaño de la muestra, por lo tanto, se explicará las ecuaciones utilizadas para hallar el límite óptimo del gráfico sintético $X - CRL$ para el caso de las variables peso y altura de la maquina HAS-200. Lo primero que se debe hacer es determinar el ARL teórico que se trabajara, por lo tanto, se usa la ecuación (4) [9], el cual se implementa cuando $\delta = 0$, además el valor de $k=3$, como resultado el $ARL(0) = 370,4$.

$$ARL(0) = \frac{1}{2\phi(-k)} * \frac{1}{1-(1-2\phi(-k))^L} \quad (4)$$

Luego ya obtenido el ARL teórico de la ecuación 3 ahora se supondrá que k no es conocida siendo una incógnita, por consiguiente, se soluciona la ecuación inicializándola con $L=1$ para hallar k con la condición de que $ARL(0) = 370,4$, después se prosigue aplicando la ecuación (5) [8] donde se insertó los datos de la HAS-200.

$$P = 1 - \phi(k - \delta\sqrt{n}) + \phi(-k - \delta\sqrt{n}) \quad (5)$$

Por consiguiente aquellos datos a tener en cuenta para la primera variable de altura es la desviación estándar que es igual a 0,77 pero se redondeó a un decimal al número menor cercano $s=0,7$, este redondeo con el fin de hacer más general la teoría; no obstante, esto se aplica también para la variable peso siendo $s=1,14$ redondeándolo a $s=1,1$. Por otro lado, otro dato a conocer es el tamaño del subgrupo que conforma la muestra, el cual para las dos variables que se trabajaron es $n=1$ y por último la k obtenida anteriormente, para lo anterior se utiliza la ecuación (5).

Consecutivamente se aplicó de la ecuación (6) [8] para hallar el ARL cuando $L=1$ y con la P obtenida anteriormente con los datos de las variables.

$$ARL_S(\delta) = \frac{1}{P} \times \frac{1}{1-(1-P)^L} \quad (6)$$

Como resultado se obtuvo el primer ARL, pero este proceso se debe repetir varias veces incrementando L para obtener el menor ARL, cabe destacar que el ARL mínimo se determina cuando este mismo no puede decrecer más, esto se visualiza en la Tabla 1 para la variable altura.

Tabla 1. Optimización límites CRL variable altura

L	K	ARL
31	2,574	51,815699
32	2,579	51,8017335
33	2,584	51,7937493
34	2,589	51,7912807
35	2,593	51,7939093
36	2,598	51,8012561
37	2,602	51,8129786

Al hallar el menor ARL se completa el ejercicio de optimización, por lo tanto, se recolecta el dato del límite L de la variable altura y peso, siendo L=34 y L=15 respectivamente como se muestra en la Tabla 2, cuyos límites se plasman en el gráfico CRL, mientras la k obtenida se usó para reemplazarlo en las ecuaciones (1) y (2), causando modificación a los límites de control superior e inferior del X.

Tabla 2. Datos obtenidos para cada variable en la optimización del CRL

Datos	Altura	Peso
L	34	15
K	2,589	2,455
ARL(δ)	51,791	15,204

Para los límites del gráfico sintético X - RL₂ se tuvo como referencia la Tabla 3 de datos del ARL, k y L [5]. Al encontrar los valores óptimos usando de guía n y δ , el cual se determinó la L para graficar el RL₂ para las variables peso y altura que se encuentra en la Tabla 3, además el valor k se reemplazó en las ecuaciones (1) y (2) para modificar los límites superior e inferior del X.

Tabla 3. Valores óptimos para el gráfico X - RL₂ para cada variable [5]

Datos	Altura	Peso
L	26	13
K	2,239	2,083
ARL(δ)	51,520	15,970

4. RESULTADOS

En este apartado por medio del software creado, como se observa en la Figura 5, se generan los gráficos de control con los datos obtenidos de la HAS-200; en primera instancia se analizó la variable altura con el gráfico de control X, el cual su μ es de 39,218 siendo este también el LC y a partir de ello el software calcula los demás límites, como se muestra en la Figura 1, donde se observó que la variable altura sus datos de comportan de forma normal y solo se detecta 2 puntos fuera de control.



Figura 5. Gráfico de control X altura generada en el software

Luego se diseñó el gráfico sintético con los valores óptimos hallados como se muestra en la Figura 6, el cual se observó cómo los límites redujeron su valor a comparación del primer gráfico X, además se detectó 2 puntos fuera de control y respecto al CRL reconfirma que al inicio del proceso está fuera de control la altura, pero no suele suceder con frecuencia por lo que la variable altura está bajo control en el resto de la producción

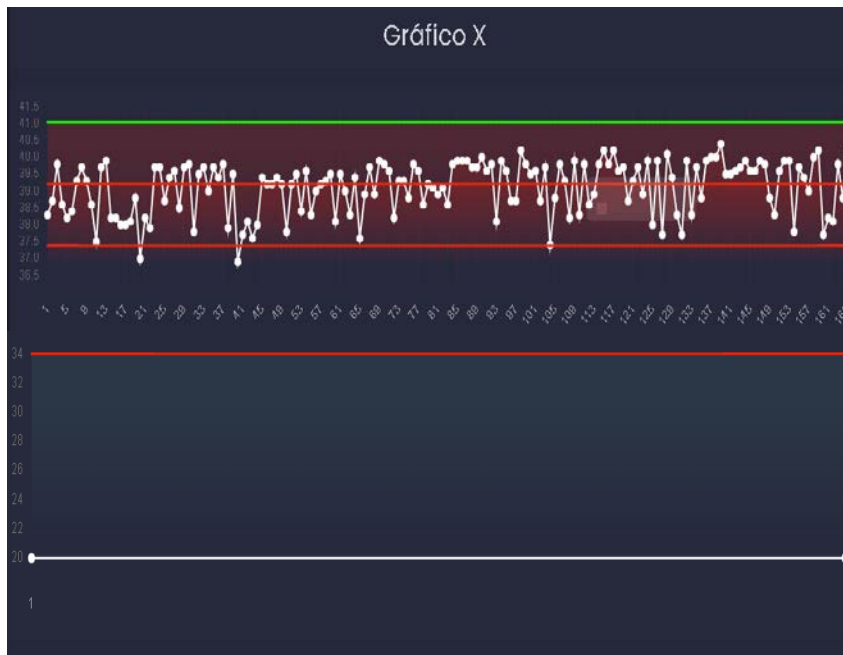


Figura 6. Gráfico sintético X - CRL altura generado en el software

Al final se realizó el gráfico sintético X - RL2 mostrado en la Figura 7 donde sus límites disminuyeron considerablemente lo cual detecta más puntos fuera de control siendo 6, por lo tanto, al observar el RL2 los puntos fuera de control para la variable altura frecuentemente si están fuera de control la mayoría, por consiguiente, se infirió que la variable altura está fuera de control.

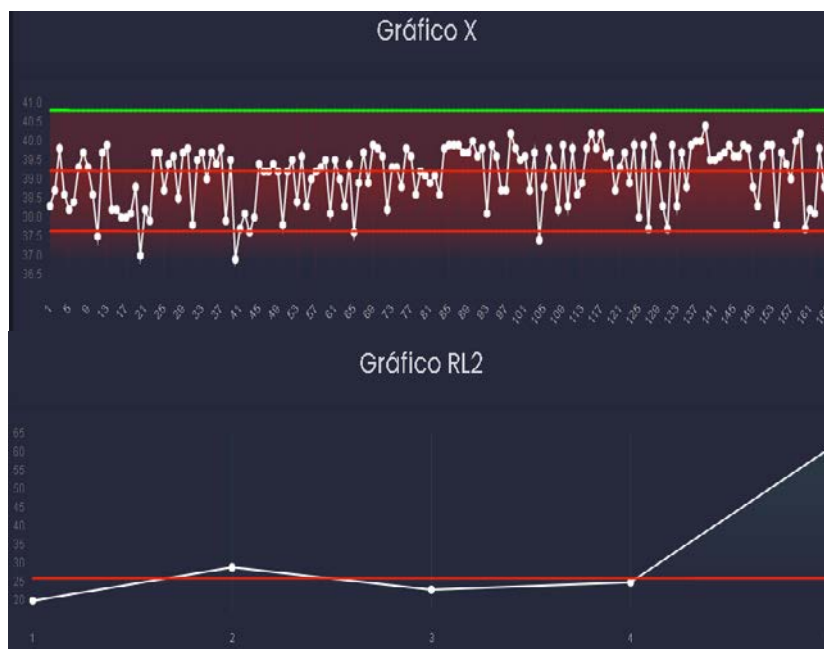


Figura 7. Gráfico sintético X - RL2 altura generada en el software

Luego se aplican las mismas gráficas para la variable peso, presentado en la Figura 8, por consiguiente, en la gráfica 4 el LC=15 y el software determino sus respectivos límites, como resultado se observó como la variable peso esta fuera de control, debido a que los puntos están por encima del límite central y se presenta varios puntos fuera de control.



Figura 8. Gráfico de control X peso generado en el software

Se procedió a realizar el gráfico sintético como se observa en la Figura 9 donde hay más puntos fuera de control a comparación de la anterior gráfica, donde se sostiene la hipótesis de que la variable peso esta fuera de control produciéndose más de lo requerido y aceptado, además en el CRL afirma que todo el proceso está fuera de control y de forma frecuente sucede aquello.

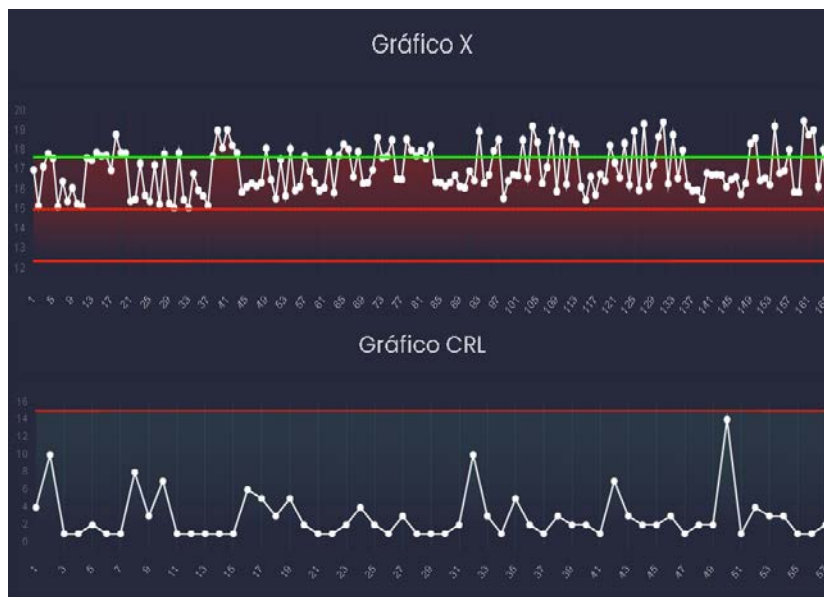


Figura 9. Gráfico sintético $X - CRL$ peso generado en el software

Después se realizó el gráfico sintético $X - RL2$ presentado en la Figura 10 para la variable peso, donde se denota más los puntos fuera de control en la Figura 6, además con el RL2 se confirma que todo el proceso está fuera de control ya que está por debajo del límite óptimo.

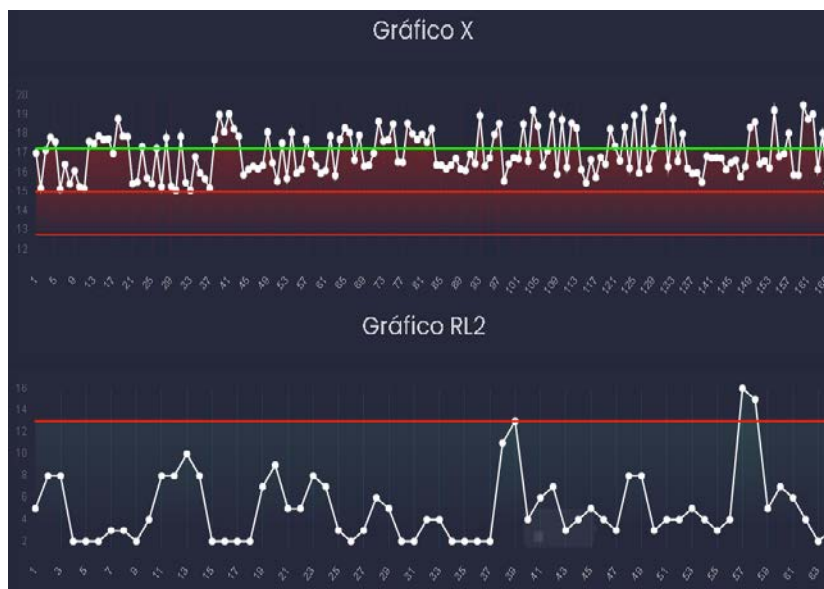


Figura 10. Gráfico sintético $X - RL2$ peso generado en el software

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez aplicadas las herramientas para la recolección de datos en la HAS-200, se procede a realizar el tratamiento correspondiente para el análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados evidenciados en la sección anterior, en el cual, la información presentada será la que indique las conclusiones a las cuales llega esta investigación.

En primera instancia se hizo un listado de los posibles factores que están causando problemas durante el proceso productivo de los contenedores con un relleno de 15 g de polímero. Para esto, se usó el diagrama de Ishikawa presentado en la Figura 11 que es un instrumento de calidad que ayuda a identificar las causas de un problema, también llamado diagrama de Espina de pescado. En el transcurso del tratamiento de la información se han realizado evaluaciones para clasificar en cuatro categorías los elementos involucrados en la ejecución del proceso que están afectando el mal funcionamiento de este. A continuación, se adjunta los resultados obtenidos.

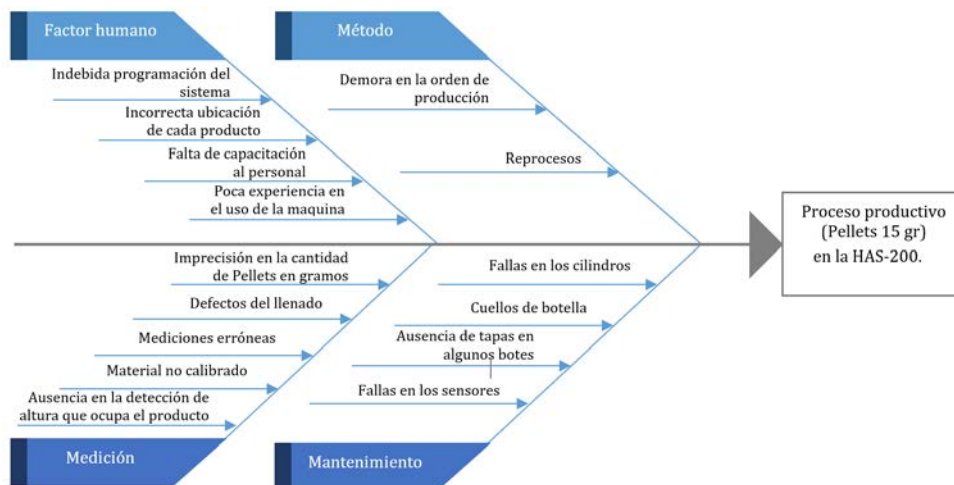


Figura 11. Diagrama de Ishikawa del proceso en la HAS-200

Teniendo en cuenta la imagen evidenciada anteriormente, se observa la existencia de varios factores que perjudican la eficiencia del proceso y como consecuencia existe la insatisfacción de los productos elaborados. Las causas vistas como prioridades son la demora de las ordenes de producción, lo que conlleva a la imprecisión en la cantidad de pellets que contiene cada contenedor dejando un producto no conforme que incumple con los requisitos exigidos y por esta razón se debe ejecutar nuevamente el proceso.

Se evidencia un análisis cuantitativo a través de los resultados originados del software creado, debido a que al analizar el comportamiento de las variables altura y peso existen varios aspectos relevantes a mencionar que se tuvieron presentes durante el estudio, inicialmente se tomó como referencia dos parámetros importantes que son: la media y la desviación estándar debido a que determinan si una o más variables pueden ser continuas o no. A continuación, se analiza cada variable teniendo en cuenta los gráficos observados anteriormente.

- *Variable 1: Altura.* En el gráfico de control X se establece una distancia de 3 desviaciones estándar por encima y por debajo de la línea central representando el 99,7% de los datos ingresados al software obteniendo una mejor exactitud en los resultados propuestos en el informe resumen del programa.

Para este gráfico existen dos puntos que se encuentran por debajo del límite de control inferior, correspondientes a la posición número 20 y 40 de la muestra que pertenece a la población de datos de la HAS 200 según la producción ejecutada. Otro aspecto a tener en cuenta es que el gráfico empieza a tener una tendencia de un comportamiento adecuado evidenciando que los puntos finales se encuentran dentro de los límites, haciendo pensar que la producción muy posiblemente este bien, obteniendo una consistencia después de la posición número 41 con respecto al valor medio establecido que es de 39,218.

En el gráfico $X - CRL$ existen 3 puntos que se encuentran por debajo del límite de control inferior, ocupando las siguientes posiciones: 20, 40 y 104. Si se compara esta gráfica con la anterior se puede observar que efectivamente son los mismos dos puntos que están por fuera de control, la diferencia es que en este gráfico sintético se detectó uno más, permitiendo obtener resultados más eficientes para detectar cambios en la media de la producción más rápidamente que el tradicional gráfico de control X .

También se evidencia que en la posición 105 en adelante los puntos se mantienen dentro de los límites de control, por tal razón, se considera que el proceso empezó a estar bajo control y la muestra es conforme.

En el gráfico $X - RL_2$ existen 6 puntos que se encuentran por debajo del límite de control inferior, ocupando las siguientes posiciones: 11, 20, 40, 43, 65 y 104. Si se compara esta gráfica con las anteriores se puede observar que efectivamente son los mismos puntos que están por fuera de control, la diferencia es que en este gráfico sintético se detectaron más, permitiendo obtener un mejor resultado para detectar cambios en la media de la producción, presentando un mejor desempeño a comparación del tradicional gráfico X y el gráfico sintético $X - CRL$. También se evidencia que en la posición 105 en adelante los puntos se mantienen dentro de los límites de control, permitiendo obtener un proceso bajo control.

- *Variable 2: Peso.* En el gráfico de control X existen 31 puntos que se encuentran por encima del límite de control superior de la muestra que pertenece a la población de datos de la HAS 200 según la producción ejecutada correspondiente a una media de 15 gr. Otro aspecto a tener en cuenta es que el gráfico nunca tiene una tendencia normal, debido a que la mayoría de los puntos presentan un comportamiento errático, es decir, cambios bruscos que se salen del límite superior lo que infiere que la producción no se encuentra funcionando de la mejor manera.

En el gráfico $X - CRL$ existen 57 puntos que se encuentran por encima del límite de control superior. Si se compara esta gráfica con la anterior se puede observar que efectivamente son los mismos 31 puntos que están por fuera de control, la diferencia es que en este gráfico sintético se detectaron 26 más, permitiendo obtener resultados más eficientes para detectar cambios en la media de la producción más rápidamente que el tradicional gráfico de control X . También se evidencia que el proceso nunca cambia para estar bajo control, esto da a comprender que la muestra no es conforme.

En el gráfico $X - RL_2$ existen 65 puntos que se encuentran por encima del límite de control superior. Si se compara esta gráfica con las anteriores se puede observar que efectivamente son los mismos puntos que están por fuera de control, la diferencia es que en este gráfico sintético se detectaron mucho más, permitiendo obtener un mejor resultado para detectar cambios en la media de la producción, presentando un mejor desempeño a comparación del tradicional gráfico de control X y el gráfico sintético $\bar{X} - CRL$.

6. CONCLUSIONES

El gráfico $X - RL_2$ es diseñado para detectar incrementos en la probabilidad de que una muestra sea no conforme, debido a que desde el inicio del control de la producción se contabiliza el número de puntos hasta que se detecte la segunda muestra no conforme y así sucesivamente. Por tal razón, la variable peso y altura tienen en su producción causas asignables donde se debe revisar y explicar el motivo de las variaciones, es decir, que el proceso no se encuentra bajo control.

Se evidencia que en el gráfico sintético $X - RL_2$ los valores tanto de los límites como de la constante k son menores comparados del gráfico sintético $X - CRL$, no obstante, esto se ve reflejado en los límites superiores e inferiores, donde este mismo es más exigente detectando puntos fuera de control en el proceso de la HAS-200 a comparación del gráfico X y el gráfico $X - CRL$; sin embargo, cuando se compara los ARL buscando el valor mínimo para los casos de la variable altura y peso en la HAS-200, se pudo observar que para la altura es mejor usar el gráfico sintético $X - RL_2$, mientras que para el peso es conveniente usar el gráfico sintético $X - CRL$ porque tiene un menor ARL para la experimentación realizada; como resultado, se corrobora

que el gráfico sintético X–RL2 es una propuesta que se puede aplicar para situaciones específicas cuando se comparan los ARL.

Los gráficos sintéticos tuvieron un papel fundamental en la investigación debido a que monitorizaron con un 100% de inspección según lo establecido en la teoría, es decir, se observó que hubo una superioridad en los gráficos X-CRL y X–RL2 a comparación del gráfico de Shewhart tanto para la variable de peso como la de altura generando una herramienta útil para mejorar diferentes procesos en una organización; por último, cabe destacar la creación del software *Control Chart* el cual es una herramienta que permitió replicar estos análisis de forma automatizada y versátil a los requerimientos que se pidió dando resultados eficientes a lo que se estableció en la investigación.

REFERENCIAS

- [1] E. Vives, *Control de calidad: control estadístico de procesos de Diseño y análisis de experimentos 4º*, México, 2008, pp. 4.
- [2] E. A. Chaparro, y J. A. Vargas, "Gráficos de control para la media de un proceso en poblaciones con distribución asimétrica" *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 23, n° 2, p. 30, 2000.
- [3] G. A. Campos-Avendaño, "Caracterización y optimización de los gráficos X-RL2 para el control de la posición y S-RL2 para el control de la dispersión" *Universidad Politécnica de Valencia, España*, 2012.
- [4] A. Ruiz, y F. Rojas, *Control estadístico de procesos*, Recuperado: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net>
- [5] G. A. Campos Avendaño, *El control de los procesos en la manufactura: alternativas a los gráficos de control sintéticos y su optimización*. Fundación Universitaria Konrad Lorenz, 2017.
- [6] F. Aparisi y M. De luna, "Synthetic X - control charts optimized for in-control and out-of-control regions" *Computers & Operations Research*, vol. 36, n° 12 p. 32, diciembre 2009.
- [7] W. Mendenhall, R. Beaver y B. Beaver, *Introducción a la probabilidad y estadística*, Riverside: Cengage Learning, 2006.
- [8] Z. W. & T. Spedding, "A Synthetic Control Chart for Detecting Small Shifts in the Process Mean", *Journal of Quality Technology*, vol. 32, n° 1, pp. 32-38, 2018.
- [9] D. Montgomery, *Introduction statistical quality control*, Limusa Wiley, Sixth Edition, Estados Unidos, 2009.

SACUW: Una herramienta software para analizar el comportamiento y usos de redes WiFi

Francisco Clemente Valle Díaz¹

Mauricio Alonso Villalba²

Nicolás Zambrano Rodríguez³

Universitaria Agustiniiana

Colombia

Se presenta a la comunidad el software SACUW, diseñado para operar como una herramienta de análisis de datos de redes WiFi capturados con el sniffer Kismet. Para su construcción se utilizó el lenguaje Dart y el Framework Flutter, los cuales permiten movimientos en el desarrollo de una página web y una aplicación para dispositivos móviles, que trabajen con los sistemas operativos Android e IOS. De igual manera se pretende colaborar en la creación de una conciencia colectiva en torno a la ciber-seguridad, mostrando la información que se puede obtener de las tramas capturadas y analizadas en grandes volúmenes.

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Gerencia de proyectos de telecomunicaciones y Magister en TIC.

Contacto: francisco.valle@uniagustiniana.edu.co

² Ingeniero de Sistemas.

Contacto: mauricio.alonso@uniagustiniana.edu.co

³ Estudiante de último semestre de la Tecnología en Desarrollo de Software.

Contacto: nicolas.zambrano@uniagustiniana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El uso seguro de la internet ha sido estudiado y debatido en diversas publicaciones [1-3]. Este se muestra como uno de los desafíos que deberán enfrentar las generaciones actuales y futuras. Es posible identificar en nuestros días el uso masivo que se realiza de las redes WiFi [4] como pasarela de acceso a internet, en parte debido a esfuerzos gubernamentales enfocados en el despliegue de la infraestructura de comunicaciones necesaria para satisfacer la creciente demanda de conectividad [5].

Sin embargo, el éxito que ha tenido la tecnología que permite estar conectados a la red, se ha visto acompañado por un aumento en los vectores de ataques sobre las infraestructura y sus usuarios [6] aumentando la presión sobre los profesionales encargados de la administración de las redes. Así mismo se observa una evolución constante en las técnicas utilizadas por los ciber-delincuentes [7, 8]. Entre los ataques documentados encontramos a los tipo hombre en el medio [9], los que usan un Access Point renegado [10], así como ataques derivados de vulnerabilidades tanto en el hardware como en el software [11-17].

De otra parte, la falta de concientización en temas de ciberseguridad, de parte de los usuarios de internet suele facilitar el éxito de diversos ataques [3], sin embargo es de destacar que en el campo de las redes WiFi se observan esfuerzos de índole académicos encaminados a mejorar dicha situación [18-21].

Dentro de los diferentes software que pueden ser utilizados para capturar tráfico de redes WiFi destacamos el llamado Kismet utilizado para múltiples propósitos [22, 23]. En el presente escrito introducimos una nueva herramienta diseñada para complementar los estudios desarrollados con Kismet, facilitando a la comunidad académica el análisis de comportamientos derivados del uso de redes WiFi – SACUW.

2. MÉTODO

En el desarrollo del software SACUW se utilizó el framework Flutter/Dart, que permite crear aplicaciones web y móviles para el análisis de datos y facilitar su visualización con experiencia UX y UI. Para entender mejor cada sección que se quiere explicar, en Flutter se utilizan widgets que permiten construir un texto o cargar una imagen junto con diversos componentes para el desarrollo de nuestra aplicación. A continuación, se hablará de las fases desarrolladas.

2.1 Fase 1 del código: Inicio del método Main

Al crear el proyecto en Flutter tenemos una pagina por defecto, la cual permite defenir cuales son las rutas que tendrá nuestra app, por tal motivo se crean las páginas que necesitamos. En el metodo main definimos cual es el screen principal de nuestra aplicación tal y como se observa en la Figura 1, ya que el main permite ejecutar la aplicación para que tenga una funcionalidad a la hora de cargarlo en el dispositivo móvil.

```
Widget build(BuildContext context) {
  return MaterialApp(
    debugShowCheckedModeBanner: false,
    initialRoute: 'CardDetail',
    theme: ThemeData(
      textTheme:
        GoogleFonts.vesperLibreTextTheme(
          Theme.of(context).textTheme,
        ),
    ),
    routes: {
      'FistPage': (_) => SliderExpLainPage(),
      'MenuPage': (_) => MenuScreen(),
      'CardDetail': (_) => CardDetailScreen()
    },
  );
}
```

Figura 1. Definición del primer screen

2.2 Fase 2 del código: Creación screen firstpage

En el archivo SliderExpLainPage.dart se implementa una librería llamada IntroduccionScreen, que permite crear un *Slider* (Figura 2) que tendrá un máximo de 4 páginas en donde se explica la funcionalidad que

tendrá la app por medio de una imagen y una pequeña descripción en cada una las paginas, al finalizar la slider tendrá un botón para comenzar el proceso que dirigirá a la segunda parte de la app (Figura 3).

```
PageViewModel(  
  titleWidget: Text(  
    'Muestra de datos',  
    style: TextStyle(fontSize: 30, fontWeight: FontWeight.bold),  
    textAlign: TextAlign.center,  
  ), // Text  
  bodyWidget: Padding(  
    padding: const EdgeInsets.only(left: 10, right: 10),  
    child: Text(  
      'is simply dummy text of the printing and typesetting industry.'  
      style: TextStyle(height: 1.8),  
    ), // Text  
  ), // Padding  
  image: buildImage(  
    'assets/onboarding/undraw_app_data_re_vg5c.png',  
  ),  
),
```

Figura 2. Librería IntroduccionScreen

```
footer: ElevatedButton(  
  onPressed: () {  
    Navigator.push(  
      context,  
      MaterialPageRoute(  
        builder: (context) => MenuScreen(),  
      ), // MaterialPageRoute  
    );  
  },  
  child: Text(  
    'Comenzar',  
    style: GoogleFonts.vesperLibre(),  
  ), // Text  
  style: ElevatedButton.styleFrom(  
    primary: Colors.black,  
    elevation: 5,  
    textStyle: TextStyle(  
      color: Colors.white,  
      fontSize: 20,  
    ), // TextStyle  
    shape: RoundedRectangleBorder(  
      borderRadius: BorderRadius.all(  
        Radius.circular(20),  
      ), // BorderRadius.all  
    ), // RoundedRectangleBorder  
  ),  
), // ElevatedButton
```

Figura 3. Contenido de una de las páginas con su botón

2.3 Fase 3 del código: Lectura del api con la información del archivo kismet

Dentro del proyecto se crean dos carpetas una llamada Services y la otra titulada Model (Figura 4). En la primera carpeta se crea un archivo Services que permite hacer la solicitud http de forma asincrónica la cual otorga acceso a la información del archivo en tiempo real.

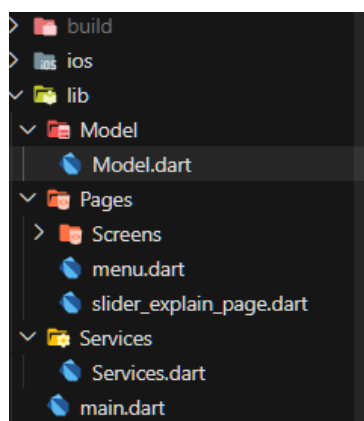


Figura 4. Carpetas Model y Service

2.4 Carga de archivos a la plataforma (temporal)

Para cargar el archivo proveniente de Kismet, se necesita una plataforma Firebase ya que esta permite generar una Api con la información establecida (Figura 5), al Clickear en el archivo se abrirá el Api donde se encuentran las propiedades del archivo Kismet (Figura 6).



Figura 5. Carga del archivo Kismet en formato Json

```
"kismet.device.base.basic_crypt_set": 2,
"kismet.device.base.basic_type_set": 2,
"kismet.device.base.channel": "",
"kismet.device.base.commonname": "AC:E0:10:8D:85:D1",
"kismet.device.base.crypt": "",
"kismet.device.base.datasize": 0,
"kismet.device.base.first_time": 1616474629,
"kismet.device.base.freq_khz_map": {
},
"kismet.device.base.frequency": 0,
"kismet.device.base.key": "4202770D00000000_D185BD10E0AC",
"kismet.device.base.last_time": 1616474630,
"kismet.device.base.macaddr": "AC:E0:10:8D:85:D1",
"kismet.device.base.manuf": "Liteon Technology Corporation",
"kismet.device.base.mod_time": 1616474631,
"kismet.device.base.name": "",
"kismet.device.base.num_alerts": 0,
"kismet.device.base.packets.crypt": 0,
"kismet.device.base.packets.data": 0,
"kismet.device.base.packets.error": 0,
"kismet.device.base.packets.filtered": 0,
"kismet.device.base.packets.llc": 0,
"kismet.device.base.packets.rx": 0,
"kismet.device.base.packets.total": 0,
"kismet.device.base.packets.tx": 0,
"kismet.device.base.phyname": "IEEE802.11",
"kismet.device.base.related_devices": {
```

Figura 6. Visualización del archivo ya cargado y generado con su respectiva Api

2.5 Fase 4 del código: Solicitud http: para el archivo

Dentro del archivo Models se crea un modelado de clases que contiene la información de red, también se implementa un método que contiene las diferentes propiedades del archivo (Figuras 7 y 8). Por otro lado, se construye una clase que permite realizar una solicitud http de forma asíncrona para traer lo datos necesarios (Figura 9).

```
class: Dot11Device {
  Dot11Device {
    required this.dot11DeviceBeaconFingerprint,
    required this.dot11DeviceBssTimestamp,
    required this.dot11DeviceClientDisconnects,
    required this.dot11DeviceClientDisconnectsLast,
    required this.dot11DeviceClientMap,
    required this.dot11DeviceDataSize,
    required this.dot11DeviceDataSizeRetry,
    required this.dot11DeviceLastBeaconTimestamp,
    required this.dot11DeviceLastBssId,
    required this.dot11DeviceLastSequence,
    required this.dot11DeviceLinkMeasurementCapable,
    required this.dot11DeviceMaxTxPower,
    required this.dot11DeviceMinTxPower,
    required this.dot11DeviceNeighborReportCapable,
    required this.dot11DeviceNumAdvertisedSsids,
    required this.dot11DeviceNumAssociatedClients,
    required this.dot11DeviceNumClientAps,
    required this.dot11DeviceNumPayments,
    required this.dot11DeviceNumProbedSsids,
    required this.dot11DeviceNumRespondedSsids,
    required this.dot11DeviceNumRetries,
    required this.dot11DeviceProbedFingerprint,
    required this.dot11DeviceResponseFingerprint,
    required this.dot11DeviceTypeset,
    required this.dot11DeviceMpaPresentHandshake,
    required this.dot11DeviceMpsM3Count,
    required this.dot11DeviceMpsM3Last,
  };
};
```

Figura 7. Creación del modelado de datos 1

```

class Dot11DeviceClientMap {
  Dot11DeviceClientMap({
    required this.the48E244E5CcB3,
  });

  The48E244E5CcB3 the48E244E5CcB3;

  factory Dot11DeviceClientMap.fromJson(Map<String, dynamic> json)
  => Dot11DeviceClientMap(
    the48E244E5CcB3: The48E244E5CcB3.fromJson(json['']),
  ); // Dot11DeviceClientMap
  Map<String, dynamic> toJson() => {
    "48:E2:44:E5:CC:B3": the48E244E5CcB3.toJson(),
  };
}

class The48E244E5CcB3 {
  The48E244E5CcB3({
    required this.dot11ClientBssid,
    required this.dot11ClientBssidKey,
    required this.dot11ClientDataSize,
    required this.dot11ClientDataSizeRetry,
    required this.dot11ClientDecrypted,
    required this.dot11ClientFirstTime,
    required this.dot11ClientLastTime,
    required this.dot11ClientNumFragments,
    required this.dot11ClientNumRetries,
    required this.dot11ClientRxCryptset,
    required this.dot11ClientTxCryptset,
    required this.dot11ClientType,
  });
}

```

Figura 8. Creación del modelado de datos 2

```

Future<RedData?> getData() async {
  final response = await http.get(Uri.parse(
    'https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/proyecto-de-grado-7c7d6...
  ));
  try {
    if (response.statusCode == 200) {
      print(response.body);
      return RedData.fromJson(json.decode(response.body));
    } else {
      throw Exception('Fallo al cargar el Api');
    }
  } catch (e) {
    return null;
  }
}

```

Figura 9. Creación del método para la solicitud http que me trae los datos

2.6 Fase 5 del código: Distribuir la información del api en la app

Se crea un archivo llamado HomeScreen.dart en el cual se asigna a cada campo la propiedad correspondiente extraída de Api según el método descrito en la fase 4 (Figura 10).

```

child: Padding(
  padding: EdgeInsets.only(
    left: 20,
    right: 20,
    top: 20,
    bottom: 10,
  ), // EdgeInsets.only
  child: Row(
    mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.spaceBetween,
    children: [
      Column(
        mainAxisAlignment:
          MainAxisAlignment.spaceBetween,
        crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,
        children: [
          Text(
            redes[index],
            style: TextStyle(
              fontSize: 18,
              color: Colors.white,
            ), // TextStyle
          ), // Text
          Text(
            'Wi-Fi AP',
            style: TextStyle(
              fontSize: 12,
              color: Colors.white,
              fontWeight: FontWeight.w500, // Text5
            ), // Text
          ), // Text
        ],
      ), // Column
    ],
  ), // Row
)

```

Figura 10. Asignación de propiedades

3. RESULTADOS

Para comenzar con el proyecto se debe cargar el archivo Kismet en el apartado storage, seguido subimos el archivo json, luego de lo cual automáticamente se generará una Api que será consumida dentro de la aplicación, por ende, se mostrarán los resultados de dicha visualización tal como se observa en las Figuras 11 y 12. Al cargar el archivo se abrirá una ventana que permitirá visualizar el fichero en formato json subido a una nube en la cual el mismo archivo dará el Api para ser consumida en la aplicación.

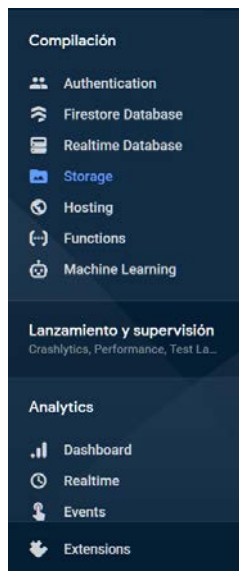


Figura 11. Creación del método para la solicitud http que trae los datos, parte 1

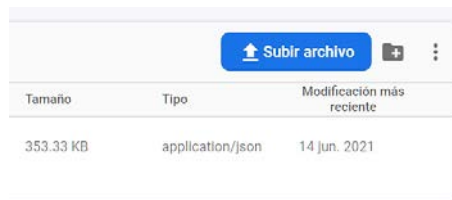


Figura 12. Creación del método para la solicitud http que trae los datos, parte 2

3.1 Comienzo de app

Al ser cargado el archivo en firebase, permitirá disponer de la información que será utilizada en la aplicación, cuando se dé inicio a la misma. Está tendrá varias sliders de explicación de los pasos que se realizaron anteriormente (Figuras 13, 14 y 15).



Figura 13. Slider parte 1



Figura 14. Slider parte 2



Figura 15. Slider parte 3

3.2 Listas de nombre dispositivos

Al tocar el botón de *Comenzar* arrojará una lista de todos los dispositivos que se obtuvieron al realizar la captura de diversas redes WiFi (Figura 16).

Al pasar de Screen se encontrarán una lista de nombres que describe cada dispositivo escaneado. Al seleccionar alguno se encontrarán con un nuevo Screen y se podrá visualizar las demás propiedades que trae el dispositivo tales como: nombre de red, tipo de red, tipo de seguridad, etc. (Figura 17)

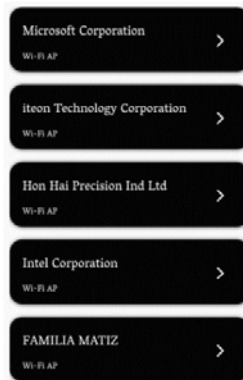


Figura 16. Lista de nombres de dispositivos



Figura 17. Información del dispositivo seleccionado

3.3 Menú de interacción

Al entrar en la lista de Dispositivos, la aplicación presentará un menú que tendrá dos opciones la sección *Home* (Figura 18) que permitirá estar en la lista de dispositivos, la otra sección es GPS (Figura 19). En la sección GPS se visualiza las coordenadas de dichas redes lo que facilitará su ubicación en un mapa.

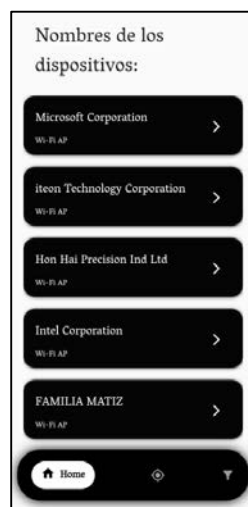


Figura 18. menú Sección Home

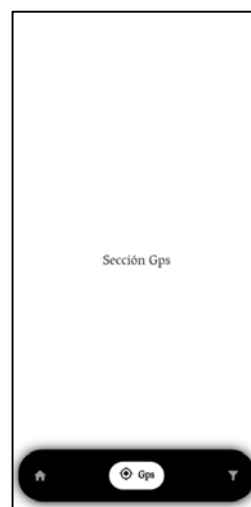


Figura 19. Menú Sección GPS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Conforme se avanzó en las diferentes etapas del desarrollo del software, se aplicaron diferentes métodos para la recolección de la información y proyectarla de una forma clara y concisa de manera que el usuario

al observarla pudiese interactuar con esta de manera intuitiva. Al comienzo de la aplicación se realizó su MockUp para tener una guía de cómo se iba a realizar la aplicación apoyado en cursos, artículos, inspiración en otros diseños UX y UI.

Por otro lado, la consulta de diferentes frameworks de diseño de aplicaciones permitió la implementación de un entorno de desarrollo amigable, eficiente y secuencial al momento de desarrollar la programación, se utilizaron extensiones para el entendimiento del código, diferenciar los tipos de archivos en conjunto, ya que cada archivo tiene un código y un método diferente al resto.

En el archivo Model se utilizó la página web QuickType, que permitió un modelado del Api que será mejor entendido

Respecto de Flutter es pertinente manifestar que es de código abierto desarrollado por Google para crear aplicaciones nativas de forma fácil, con la última actualización (Flutter 2.0) se implementaron mejoras en el Framework tales como implementación en páginas web, corrección de nuevos bugs a la hora de programar aplicación en IOS, tener un renderizado más rápido a la hora de ejecutar la aplicación en un dispositivo móvil. También una de las características que se mejoraron con la actualización fue el tiempo de carga, que mejoro hasta los 1.30 segundos.

5. CONCLUSIONES

Para capturas realizadas con Kismet, que contengan datos de GPS, se debe trabajar librerías que implementen coordenadas cartesianas, diseños de mapas y en conjunto datos de geolocalización de manera que futuras versiones de SACUW puedan ser utilizadas para el mapeo de redes WiFi.

El software SACUW facilita el perfilamiento y segmentación de los datos obtenidos en una captura WiFi, permitiendo así el análisis de los mismos, identificando los diferentes tipos de tramas del protocolo 802.11 de la IEEE entre ellas las probe y beacon. De igual manera permite establecer métricas de uso frente a las frecuencias en las cuales operan dichas redes.

Luego de revisar el archivo entregado por Kismet, se establece que el método más importante en la realización del software es la conversión a un formato JSON el cual facilita de manera considerable el análisis de los datos. Usando el lenguaje Dart y el framework flutter

La información de uso de redes WiFi podría llegar a ser utilizada para establecer patrones de movilidad entre los usuarios activos de redes en determinados puntos de una ciudad, basados en diversas capturas y su posterior análisis.

REFERENCIAS

- [1] N. Gcaza and R. von Solms, "A strategy for a cybersecurity culture: A South African perspective," *Electron. J. Inf. Syst. Dev. Ctries.*, vol. 80, no. 1, pp. 1–17, 2017.
- [2] Z. Malone, "Three Common Security Mistakes and Best Practices to Eliminate Them in the New Year," *cyber Def. Mag.*, pp. 42–45, 2019.
- [3] Eleven Paths, "Informe de tendencias en ciberseguridad 2019," 2019.
- [4] I. Landa-Torres, S. Gil-Lopez, J. Del Ser, S. Salcedo-Sanz, D. Manjarres, and J. A. Portilla-Figueras, "Efficient citywide planning of open WiFi access networks using novel grouping harmony searchheuristics," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 3, pp. 1124–1130, 2013.
- [5] M. Botein, "Regulation of Municipal Wi-Fi," *NYL Sch. L. Rev.*, vol. 51, p. 974, 2006.
- [6] M. Waliullah, A. B. M. Moniruzzaman, and M. S. Rahman, "An Experimental Study Analysis of Security Attacks at IEEE 802.11 Wireless Local Area Network," *Int. J. Futur. Gener. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 9–18, 2015.
- [7] S. Gordon, "Wifi security cracked," *Netw. Secur.*, vol. 2011, no. 1, pp. 2–20, 2011.
- [8] S. L. Cebula, A. Ahmad, L. A. Wahsheh, J. M. Graham, S. L. DeLoatch, and A. T. Williams, "How secure is WiFi MAC layer in comparison with IPsec for classified environments?," no. October, pp. 109–116, 2011.
- [9] M. Choi, R. J. Robles, C. Hong, and T. Kim, "Wireless Network Security: Vulnerabilities, Threats and Countermeasures," *Int. J. Multimed. Ubiquitous Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 77–86, 2008.

- [10] J. Milliken, V. Selis, and A. Marshall, "Detection and analysis of the Chameleon WiFi access point virus," *EURASIP J. Inf. Secur.*, vol. 2013, no. 1, p. 2, 2013.
- [11] Certsi, "Múltiples vulnerabilidades en productos Juniper | CERTSI," 2018. Recuperado: <https://www.certs.es/alerta-temprana/avisos-seguridad/multiples-vulnerabilidades-productos-juniper-2>
- [12] Juniper, "Juniper Networks - 2018-01 Security Bulletin: MX series, SRX series: Junos OS: Denial of service vulnerability on devices with ALG enabled. (CVE-2018-0002)," 2018. Recuperado: https://kb.juniper.net/InfoCenter/index?page=content&id=JSA10829&cat=SIRT_1&actp=LIST
- [13] Juniper, "Juniper Networks - 2018-01 Security Bulletin: Junos OS: Malicious LLDP crafted packet leads to privilege escalation, denial of service. (CVE-2018-0007)," 2018. Recuperado: https://kb.juniper.net/InfoCenter/index?page=content&id=JSA10830&cat=SIRT_1&actp=LIST
- [14] Cisco, "Cisco Secure Access Control System Java Deserialization Vulnerability," 2018. Recuperado: <https://tools.cisco.com/security/center/content/CiscoSecurityAdvisory/cisco-sa-20180307-acsc2>
- [15] Cisco, "Cisco Prime Collaboration Provisioning Hard-Coded Password Vulnerability," 2018. Recuperado: <https://tools.cisco.com/security/center/content/CiscoSecurityAdvisory/cisco-sa-20180307-cpcp>
- [16] B. A. Jacques, "Top-of-Mind Tech Trends Cybersecurity , Virtual Reality and Artificial Intelligence," 2016.
- [17] Intel, "Latest Intel Security News: Updated Firmware Available for 6th, 7th and 8th Generation Intel Core Processors, Intel Xeon Scalable Processors and More," 2018. Recuperado: <https://newsroom.intel.com/news/latest-intel-security-news-updated-firmware-available/>
- [18] J. Xiong and K. Jamieson, "SecureArray: improving wifi security with fine-grained physical-layer information," *Proc. 19th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. - MobiCom '13*, p. 441, 2013.
- [19] L. He *et al.*, "Talking about WiFi's new security," *MATEC Web Conf.*, vol. 139, pp. 2-5, 2017.
- [20] A. Bartoli, E. Medvet, and F. Onesti, "Evil twins and WPA2 Enterprise: A coming security disaster?," *Comput. Secur.*, vol. 74, pp. 1-11, 2018.
- [21] F. Valle, C. Herrera, and C. Pedraza, "Hacking en servicios Web a través de redes WiFi abiertas," in *Desarrollo E Innovación En Ingeniería*, 2019, pp. 178-194.
- [22] D. Dobrilovic, Z. Stojanov, S. Jäger, and Z. Rajnai, "A method for comparing and analyzing wireless security situations in two capital cities," *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 13, no. 6, pp. 67-86, 2016.
- [23] K. Nasr, A. A.-E. Kalam, and C. Fraboul, "Performance Analysis of Wireless Intrusion Detection Systems," in *Internet and Distributed Computing Systems*, 2012, pp. 238-252.

Diseño y construcción de un algoritmo para el análisis deductivo y evaluación de la cinemática de los gestos deportivos de saque y remate de jugadores de voleibol

Hugo Armando Talledos Rodríguez¹

Marco Javier Suarez Barón²

Yolanda Torres Pérez³

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

La incorrecta ejecución de algunos gestos deportivos clave dentro del voleibol son factores que, en situaciones de partido, se pueden traducir en la pérdida de puntos necesarios para ganar los encuentros. Mientras que en el largo plazo los jugadores se pueden ver perjudicados en algunas de las extremidades involucradas, trayendo consigo afectaciones a la salud. Este capítulo tiene como objetivo brindar una herramienta que permita a los equipos de voleibol el análisis de los movimientos de los jugadores con el fin de prevenir lesiones. Para esto el trabajo sigue las siguientes fases: Registro de videos, procesamiento de videos y procesamiento de datos. Dando como resultado las gráficas necesarias que permiten la detección de movimientos anormales que estén perjudicando el estado físico del jugador.

¹ Contacto: hugo.talledos@uptc.edu.co

² Contacto: marco.suarez@uptc.edu.co

³ Contacto: yolanda.torres01@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El Voleibol es un deporte en el que dos equipos (de 6 jugadores cada uno) buscan pasar un balón por encima de una red que divide la cancha en dos, tratando de que el balón llegue al suelo del campo contrario mientras que el equipo adversario intenta impedir y replicar el objetivo anteriormente descrito, tratando de forzar un fallo en su contrincante [1]. Dos acciones importantes en el desarrollo del juego son el saque y el remate, pues ambos movimientos su finalidad principal es ofensiva, buscando dificultar al máximo la recepción del balón al contrincante [2].

El saque es la acción que da inicio a cada punto del set y busca hacer caer el balón en los espacios débiles o vacíos del otro equipo. Existen diferentes tipos de saques de balón; está el saque de abajo en donde el jugador debe posicionarse detrás de la línea de servicio, colocando las piernas con anchura igual a nuestros hombros, el cuerpo entero debe estar perpendicular a la línea de fondo, la mano que no va a golpear debe estar extendida hacia al frente con el balón, luego se eleva muy poco y la mano que golpea (cerrada en un puño) cuando el balón va bajando lo golpea con fuerza; el saque de arriba o tenis (el más complejo y utilizado) comienza colocando las piernas con anchura igual a nuestros hombros, la mano contraria a la que va a golpear debe estar extendida y en ella está el balón, luego se procede a elevar el balón y en conjunto la mano que golpea se debe posicionar extendida detrás de la nuca y una vez el balón esté en la altura deseada se golpea con mucha fuerza [1] y el saque en suspensión en potencia o flotante, el cual es similar que el anterior pero con un salto en el aire, en algunos casos el golpe en el valor es fuerte si se desea generar potencia o suave pero con efecto de difícil recepción para el contrincante (Figura 1).

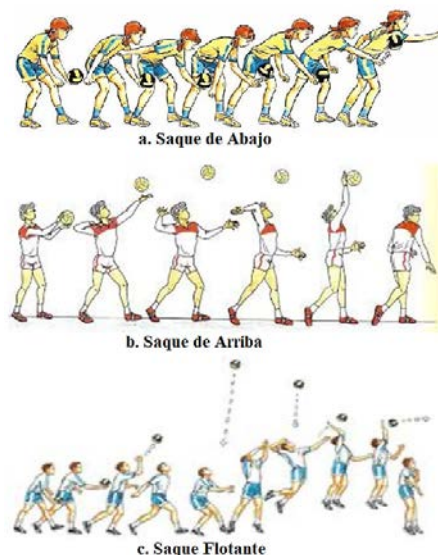


Figura 1. Tipos de servicio en voleibol

En cuanto al remate, es el principal gesto técnico de ataque del equipo, es un movimiento de ataque que busca debilitar la formación del equipo contrario y anotar un punto para su equipo, suele utilizarse en el tercer toque pero también en ocasiones puede ser utilizado en el primer toque sin necesidad de un colocador para lograr una jugada sorpresiva; inicia con la colocación del balón a una máxima altura y posición específica por encima de la red, en donde un jugador golpea el balón con toda la palma de la mano hábil. Este movimiento consta de 4 fases que son: la carrera o desplazamiento, el salto, el golpe y la caída [2] (Figura 2). Este movimiento no es sencillo ya que se puede ver afectado por un mal pase, un salto mal ejecutado por el jugador que va a rematar o por una buena defensa del equipo rival.

El remate casi siempre suele estar seguido por la acción de bloqueo del equipo contrario (Figura 3). Existen cuatro tipos de remate:

1. Remate de balón alto, es un pase con una trayectoria parabólica acentuada.
2. Remate en Corta, es un golpe al balón durante el recorrido ascendente de la trayectoria del pase.
3. Remate en Semicorta, es un intermedio entre el remate de balón alto y el remate en corta.
4. Remate en Tensa, suele ser un pase rápido de larga distancia.

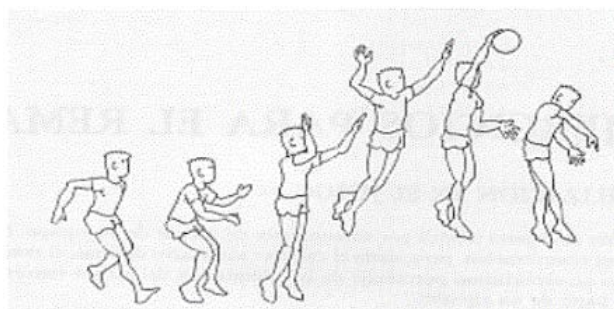


Figura 2. Fases del remate en voleibol [2]



Figura 3. Movimiento de remate en voleibol [1]

En la mayoría de los equipos de voleibol, el registro de fallas y diagnósticos de las falencias en la ejecución de movimientos deportivos recae en el primer y segundo entrenador del equipo, pero son pocos los equipos que cuentan con personal especializado en el diagnóstico y corrección en la ejecución de gestos deportivos de los jugadores [3]. Para valorar la eficacia de los gestos deportivos en los jugadores, los entrenadores utilizan adaptaciones basadas en formatos ajustados a las necesidades de cada entrenador de la escala de la Federación Internacional de Voleibol FIVB, en todos los gestos técnicos y para valorar las fases de juego se utiliza el rendimiento en la jugada [4], el cual consiste en evaluar la eficacia y la técnica que tiene el jugador para golpear el balón. Sin embargo, aun cuando se tiene estandarizado el proceso, las valoraciones y el diagnóstico realizado por los entrenadores es totalmente subjetivo y se emiten juicios basados en la experiencia [1].

Aun cuando el uso de la tecnología está presente en el deporte con el fin de mejorar el rendimiento de los deportistas, la implementación de modelos de análisis predictivos para la corrección en las técnicas son escasos, esto es en gran medida porque todo estudio biomecánico deportivo depende de la determinación de las variables cualitativas y cuantitativas que permitan medir el desempeño de los jugadores en la ejecución de los gestos deportivos y la técnica aplicada [5, 6]. Así mismo, son muy limitadas las evidencias de fuente de datos estructuradas las cuales permitan el análisis de movimiento a través de herramientas de aprendizaje de máquina, usadas para evaluar los gestos de saque y remate en voleibol, esto como consecuencia de la gran cantidad de datos altamente heterogéneos generados en la técnica de videometría y empleados para evaluar y analizar la biomecánica deportiva del voleibol [7].

En el deporte, la ejecución técnica de los movimientos es esencial, no solo porque estos marcan la diferencia numérica en justas deportivas, sino que además, estos repercuten en la integridad física de los atletas [1]. Una mala realización en los gestos, puede a largo plazo generar desgaste físico-articular y en el peor escenario, el jugador puede llegar a tener una lesión grave. El no contar con personal y tecnología especializada, la cual pueda diagnosticar oportunamente las falencias en los movimientos de los jugadores de manera cuantitativa, puede provocar que la corrección de estos no sea la adecuada [5]. Sumado a esto, la falta de un conjunto de datos especializado en los gestos deportivos de saque y remate, el cual cumpla con las características necesarias para la corrección de movimientos y prevención de lesiones en los jugadores, imposibilita el uso de herramientas de analítica de datos que sirvan como apoyo a los entrenadores en el seguimiento y evaluación del rendimiento de los integrantes del equipo. La falta de un conjunto de datos especializado se puede deber a que para llegar a un conjunto de datos estructurado que

aporte valor a la comunidad, es necesario emplear una cantidad de tiempo en el proceso adquisición, procesamiento, limpieza y organización de los datos, tal como indica [8].

A nivel internacional, se han realizado varios estudios de investigación, relacionados con el análisis de movimiento de jugadores de diversos deportes los cuales analizan variables como ángulos y trayectorias articulares, con el fin de determinar estrategias, ventajas o debilidades en los deportistas. Sin embargo, son pocos los estudios que hacen uso de herramientas de aprendizaje automático y analítica de datos. El objetivo en [9] fue determinar el aporte que ofrece el uso de big data y aprendizaje automático para la toma de decisiones tácticas en los deportes de equipo, siendo el centro del estudio los equipos de fútbol elite. Dicho estudio presentó un nuevo enfoque en el análisis de datos, pues, hasta poco antes de 2016, los análisis se realizaban con variables que en la mayoría de los casos descartan la información contextual, como la habilidad técnica, el rendimiento fisiológico individual y la formación del equipo. En muchos casos los análisis se veían limitados por la cantidad masiva de datos que estos suponían procesar y la tecnología con la que se contaba hasta la fecha [8].

En [10] se buscó determinar a partir de análisis biomecánicos el nivel de ejecución técnica del gesto de remate de las integrantes de la selección juvenil de Risaralda de Voleibol. En donde para lograr obtener resultados se analizó cada una de las fases del gesto de remate, pues cada fase tiene un objetivo principal el cual en conjunto posibilitan un remate que se caracteriza por su eficiencia y eficacia. Sumado a esto, se realizó un estudio de revisión bibliográfica sobre la técnica y efectividad biomecánica del remate en el voleibol, en la cual se identificó que la efectividad desde el punto de vista biomecánico está dada por adquirir la mayor altura posible del centro de masa para golpear el balón lo más alto posible e imprimir velocidad, potencia y precisión en la trayectoria del balón [11].

Otros estudios llegaron a la conclusión de que existen diferencias antropométricas entre los deportistas de alto rendimiento que parece ser fundamental para mejorar las estrategias de formación, como [12], que cuantifica variables antropométricas y fisiológicas de jugadores de tres deportes con el fin de encontrar patrones y características que definan las ventajas físicas, que cada disciplina desarrollaba en sus participantes esto puede ayudar en los procesos de identificación de talentos específicos.

Por otro lado, en el área de la ciencia de datos, [13] tenía como objetivo analizar las características de la recepción en voleibol, en función de la intensidad del partido, debido a la importancia en la construcción de una jugada de ataque que tenga un final exitoso. Dicho artículo concluyó que se presentan diferencias significativas en la recepción en función del nivel de la oposición en el juego.

Por lo anterior se plantea la estructuración de un conjunto de datos especializado en los gestos deportivos de saque y remate de voleibol, con el fin de otorgar una herramienta de análisis cualitativa y cuantitativa para la detección y corrección de la técnica de los gestos deportivos mencionados previamente (saque y remate), para poder proporcionar una ventaja competitiva frente a otros equipos. Así mismo, se propone como un conjunto de datos de uso libre el cual brinde un soporte a la comunidad científica y personas especializadas en inteligencia artificial, biomecánica y demás áreas que consideren útiles los resultados obtenidos en esta investigación para sus respectivos estudios.

El enfoque propuesto por este trabajo, ha sido presentado con anterioridad en otros deportes, como en el futbol, en el que a partir de técnicas de Big Data se busca hacer un análisis táctico en el futbol elite teniendo en cuenta aspectos como habilidad técnica, el rendimiento fisiológico individual y la formación del equipo. Esto ha dado paso a un enfoque multidisciplinario en el que analistas de movimiento, científicos del ejercicio y biomecánicos con la finalidad de dar sentido a un conjunto de datos complejos [9].

Las técnicas de analítica de datos son cada vez más relevantes, pues gracias a la gran cantidad de información disponible y a la alta capacidad computacional actual, hace posible estudiar cómo están relacionadas las distintas variables en un proceso con un alto nivel de abstracción. El poder obtener conocimiento tan generalizado consigue reducir el margen de error en la estimación de un resultado, permitiendo así, que la ciencia del deporte pueda dar los primeros pasos en el estudio de deportes en equipo.

Pese que a nivel colectivo parece que los avances en Big Data permiten el estudio de comportamientos, el análisis individual del rendimiento y ejecución técnica de un jugador de voleibol, sigue siendo un campo con pocos cimientos limitado a juicios subjetivos y cualitativos basados en la experiencia acumulada de los entrenadores [1].

Sin embargo, aun cuando el uso de soluciones basadas en inteligencia artificial parece ser cada vez más frecuentes, según cifras proporcionadas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones MINTIC, en Colombia, la inteligencia artificial es un área que todavía se encuentra en una etapa temprana de adopción. Hasta el 3 de octubre de 2018, solo el 1.8% de las empresas colombianas hacían uso de herramientas basadas en esta tecnología [29].

El área de los deportes no se queda atrás, pues pese a que una de las funciones del ministerio de Deporte es la de *Incentivar y fortalecer la investigación científica, difusión y aplicación de las ciencias aplicadas al deporte, para el mejoramiento de sus técnicas y modernización de los deportes* [30], son aún pocos los proyectos desarrollados para el cumplimiento de este objetivo.

El proyecto tiene como objetivo principal la construcción de un conjunto de datos sobre los gestos deportivos de saque y remate que facilite el análisis predictivo y toma de decisiones por parte de los entrenadores, previo a procesos de entrenamiento, rehabilitación o acondicionamiento para competencia. Esto se logró a partir de la captura de movimientos de deportistas de voleibol con técnicas de biomecánica para la cuantificación de los gestos de estudio. A su vez, se hizo necesario realizar una limpieza y preparación de los datos obtenidos mediante la técnica de videometría; una vez que el conjunto de datos se estructuró, se aplicaron técnicas de normalización y análisis exploratorio, con el fin de obtener un balanceo y equilibrio en los datos. Finalmente, para facilitar al entrenador el entendimiento de los datos se presenta un reporte de resultados de un análisis.

2. MARCO CONCEPTUAL

Para la mejor comprensión del contenido es necesario describir algunos conceptos, como el de *inteligencia artificial*, la cual es una ciencia que busca construir máquinas que realicen tareas humanas las cuales requieren de la facultad de conocer, entender o comprender, incorporando conocimiento a los procesos o tareas de modo que estos tengan éxito [14]. Dentro de esta ciencia se encuentra una rama conocida como *aprendizaje de máquina* la cual se enfoca en el desarrollo de sistemas que pueden cambiar de forma autónoma su comportamiento en función de su experiencia [15]. El Aprendizaje de se apoya de un concepto importante como lo es la *analítica de datos*, la cual consiste en el descubrimiento de información relevante, la cual no es posible obtener con estadística básica mediante el análisis de datos estructurados, imágenes, videos y audios [16]. También como ciencia se encarga del análisis de datos, sin embargo, no puede llegar a considerarse como un análisis de datos puro, pues, a su vez, hace uso de técnicas provenientes de la ciencia de datos de manera indiscriminada, esto genera que la analítica de datos presente ambigüedades en los términos acuñados en la literatura [17].

La analítica se encuentra dividida principalmente en dos áreas: el análisis predictivo y el análisis descriptivo. El *análisis predictivo*, abarca tareas de clasificación, donde se busca predecir categorías, y la regresión donde se predicen números. El funcionamiento de este tipo de análisis se basa en examinar el rendimiento de datos históricos, para así, encontrar relaciones clave que permitan la identificación de las razones del éxito o fracaso en el pasado, de esta forma se busca abordar con certeza acciones en el futuro [18]. Por su lado el *análisis descriptivo* lleva a cabo dos tareas principales, el agrupamiento, en el que se describe en forma de grupos, y la asociación, la cual tiene como fin describir comportamientos en formas de reglas [16].

Otro concepto que tiene gran relación con la analítica es el *Big Data*, para este no existe una definición rigurosa, sin embargo, se puede definir como un conjunto de datos o combinaciones de conjuntos de datos cuyo tamaño (volumen), complejidad (variabilidad) y velocidad de crecimiento (velocidad) dificultan su captura, gestión, procesamiento o análisis mediante tecnologías y herramientas convencionales [19]. Una parte fundamental del Big Data son los conjuntos de datos, los cuales hacen referencia a una colección de datos contenidos en una única matriz en la que cada columna tipifica una variable particular y cada fila

representa un registro determinado del conjunto de datos con el que se está trabajando [20]. De acuerdo al área de inteligencia artificial con la que se esté trabajando, el tamaño puede variar [21]. En el contexto de Big Data, el término *conjunto de datos*, hace referencia a una secuencia de datos estructurados cuyos registros son tan grandes que aplicaciones de procesamiento de datos tradicionales son incapaces de realizar esta tarea.

El presente trabajo, además de tocar temas de inteligencia artificial, se centra en el campo de la biomecánica deportiva, la cual es utilizada para el estudio y evaluación de diferentes ámbitos del deporte y que en este caso particular se centrará en la evaluación del gesto de deportistas de voleibol. La *biomecánica* surge a partir de la aplicación de la mecánica en la biología, con el objetivo de entender como la fuerza, el movimiento y la resistencia de los materiales interactúan con y en los sistemas vivos [22, 23]. Esta área de conocimiento se apoya en diversas ciencias biomédicas en un intento por combinar la ingeniería con la anatomía y la fisiología para estudiar el comportamiento del cuerpo humano y resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que puede verse sometido [24, 25]. La biomecánica ofrece diversas técnicas para el análisis de los cuerpos, entre ellas se encuentra la *videometría*, la cual es una técnica de análisis cinemático que permite, a partir de un movimiento real, estudiar diferentes parámetros biomecánicos del movimiento realizado como velocidades tanto lineales como angulares y movimientos angulares articulares.

Por otro lado, la videometría incluye muchas técnicas que son útiles por sí mismas, por ejemplo, el procesamiento de imágenes relativo a la transformación, codificación y transmisión de imágenes y el reconocimiento de texturas. Además, la visión incluye técnicas para la descripción de formas y volúmenes, modelado geométrico y el llamado proceso cognitivo. Por lo tanto, aunque la visión por computadora está muy relacionada con el procesado de imágenes, estas imágenes tratan de emular las capacidades perceptivas del hombre [26].

El deporte que es centro de estudio de este trabajo es el voleibol, que como se mencionó previamente, tiene como objetivo principal pasar un balón por encima de una red que divide la cancha en dos, tratando de que el balón llegue al suelo del campo contrario mientras que el equipo adversario intenta impedir y replicar el objetivo anteriormente descrito, tratando de forzar un fallo en su contrincante [1]. Por lo anterior es que se decide estudiar dos gestos relevantes dentro de este deporte, como lo son el remate y el saque.

Estos se dividen en diferentes fases, en el caso del *remate* se compone de cinco fases las cuales se buscan maximizar para así lograr un remate que se caracterice por su eficiencia y eficacia. Las fases del remate son: Fase carrera de aproximación, fase de batida, fase preparación del golpeo, fase de golpeo, fase de caída (Figura 4). Estas fases son determinadas a partir de un análisis biomecánico.

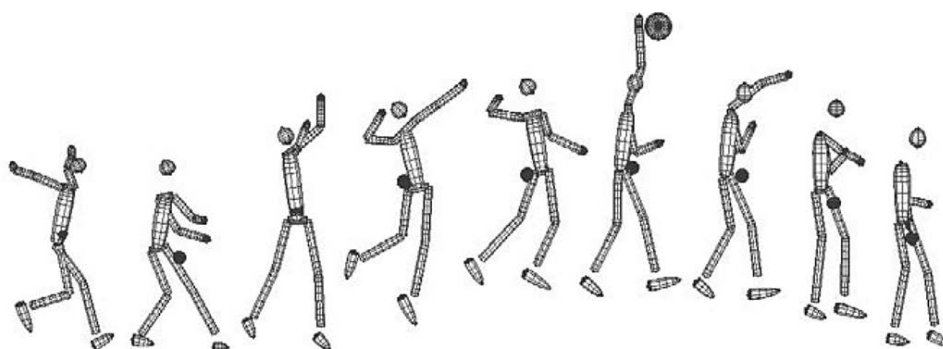


Figura 4. Fases del gesto de remate [27]

La fase carrera de aproximación tiene como objetivo principal generar la suficiente cantidad de movimiento horizontal para poder transformarlo en movimiento ascendente, el cual es usado en la fase de batida donde el jugador de voleibol realiza los movimientos necesarios para alcanzar la velocidad vertical máxima. En la fase de golpeo el jugador se encuentra suspendido en el aire y se encuentra dividida en tres sub-fases: Preparación, Armado y Aceleración. Esta se encuentra ligada con la fase de golpeo e inicia cuando la mano entra en contacto con el balón y finaliza tras la pérdida de contacto. Es aquí donde termina la sub fase de

aceleración y se completa la extensión del codo. Finalmente, el gesto de remate concluye con la fase de caída cuyo objetivo es reducir el estrés generado por el impacto del suelo contra las articulaciones del tobillo, rodilla, cadera y columna. Esta fase comienza cuando las piernas tocan el suelo y termina con el jugador equilibrado después del impacto [10].

En el caso del *gesto de saque* este tiene dos variantes, en la que la diferencia es si se realiza salto o no, en este caso se analizó el saque con salto, pues su propósito es incrementar la potencia y, al mismo tiempo, la altura de impacto al golpear el balón, de manera que se dificulte la recepción del balón por parte del adversario, evitando que estos puedan generar un ataque más contundente. En este contexto, para ejecutarlo existen dos formas: con carrera previa o en posición estática. En el primer caso, el jugador deberá retroceder más para tener espacio y de este modo acelerar la carrera. En el segundo, es importante comenzar con distancia suficiente de la línea para no pisarla y cometer falta [28].

Asimismo, el gesto técnico debe de realizarse siguiendo una serie de pasos en el que al comenzar se deberá colocar la pelota de voleibol en la mano que no va a golpear, mirando hacia arriba, para posteriormente lanzar el balón al aire a varios centímetros al frente del jugador. Una vez realizado esto y con el balón aun en el aire se hace una aproximación atacante, balanceando los brazos hacia atrás y luego hacia adelante y arriba mientras se camina hacia el frente con el pie izquierdo, elevando la velocidad del saque. El jugador de voleibol deberá saltar hacia arriba y al frente, asegurándose estar por detrás de la línea para no cometer falta de saque. La meta para poder obtener un saque eficiente es contactar con la pelota en el punto más alto que se haya alcanzado, y al mismo tiempo saltar para aumentar la incidencia del saque. Por último, golpear la pelota con la palma de la mano y continuar el movimiento con el resto del brazo [28].

3. MÉTODO

La investigación realizada es de ingeniería aplicada de tipo teórico-práctico, pues se encuentra dividida en una parte práctica, que consiste en la recolección de datos por medio de técnicas de videometría en la cual se busca capturar la naturaleza de la ejecución de los gestos de los deportistas de voleibol. Por otro lado, mediante el uso del software especializado Kinovea 0.9.3 se realizó el procesamiento de los videos obtenidos, de modo que se logró cuantificar los movimientos de las articulaciones clave de los jugadores. La parte teórica consistió en el análisis matemático y estadístico de los datos recolectados, de forma que, a partir de ecuaciones matemáticas y herramientas de software, se logró la limpieza y estructuración de datos para la obtención de curvas para su posterior estudio.

Para la elaboración del conjunto de datos se usó un enfoque mixto puesto que se utilizaron datos cuantitativos (ángulos, tiempo) y cualitativos (técnica durante la ejecución de los gestos deportivos de los jugadores de voleibol).

3.1 Muestra Poblacional

Los datos iniciales de la investigación fueron obtenidos del análisis biomecánico de los jugadores del equipo de voleibol de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Facultad Seccional Duitama. El grupo estuvo conformado por 4 hombres y 4 mujeres. De los cuales se hizo un seguimiento en los gestos de saque con y sin salto, y remate. De estos movimientos, se obtienen métricas como movimientos angulares articulares, velocidades lineales, velocidades angulares y trayectorias de puntos anatómicos de interés. En esta selección de la muestra representativa de deportistas del equipo de voleibol de la UPTC se incluyeron jugadores amateurs, otros de nivel intermedio y otros de élite.

3.2 Registro de videos

Para obtener los videos de la biocinemática deportiva de los jugadores de voleibol de la UPTC inicialmente se procedió a definir con el entrenador principal las variables que se deseaban evaluar en los gestos de los deportistas. Luego se diseñaron plantillas para toma de medidas antropométricas de los jugadores donde se registraron: nombre, apellidos, sexo, fecha de nacimiento, peso (kg), mano dominante, pie dominante, años de entrenamiento, igualmente se incluyó la medición de la altura de tobillo, rodilla, cadera, hombro,

codo, muñeca, base de cráneo; y la longitud de: pie, pierna, muslo, brazo, antebrazo, mano, base de cráneo, pecho, hombro; perímetro de: antebrazo, cadera, cefálico, cintura, metacarpo, metatarso, muslo, pecho, pierna, también se incluyó una foto referencial de cada jugador.

Al mismo tiempo se diseñaron plantillas de medidas goniométricas de los jugadores, donde a través de las medidas del plano sagital (flexo extensión), en el plano frontal (abducción), en el plano transverso coronal (rotación interna), plano transverso coronal (rotación externa) (Figura 5), se registraron medidas de: tobillo, rodilla, cadera, cuello, hombro, codo y muñeca de cada jugador incluido en la muestra de estudio.



Figura 5. Registro fotográfico de deportista en diferentes planos anatómicos

Luego de estas medias y registro fotográfico, se procede a ubicar marcadores superficiales en los puntos anatómicos de interés (Figura 6) para poder realizar posteriormente el procesamiento de los vídeos con estos puntos de referencia. Los deportistas realizaron los gestos de interés (saque y remate) durante un minuto y medio cada uno, obteniendo así varios videos del mismo gesto (10 vídeos por jugador y por gesto), con el fin de tener la mayor cantidad de información y poder procesar los videos para generar curvas cinemáticas de trayectorias, velocidades, aceleraciones, movimientos angulares articulares y de esta forma poder realizar un promedio por jugador de puntos anatómicos de interés, así como curvas de la cinemática angular articular de interés.

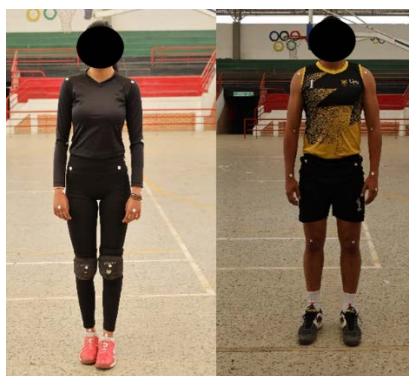


Figura 6. Ubicación de marcadores corporales en los puntos anatómicos de interés

Para la captura de los videos se contó con 2 cámaras CANON EOS R, ubicadas estratégicamente para hacer la captura del movimiento desde los planos frontal y lateral. La distribución de las cámaras con las cuales se capturaron los movimientos de los jugadores se presenta en la Figura 7.

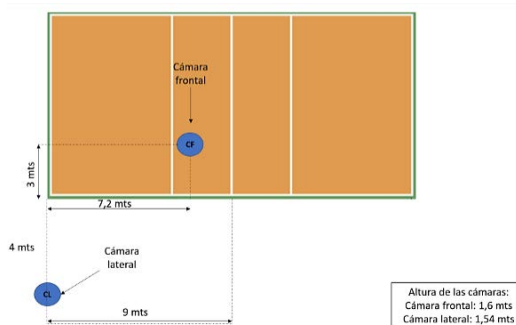


Figura 7. Montaje de cámaras en coliseo para registro del saque

3.3 Procesamiento de vídeos

Los videos del gesto deportivo de los jugadores se importaron en el software Kinovea 0.9.3 en donde se realizó un pre procesamiento por cada deportista, el cual consistió en realizar el seguimiento de los marcadores capturados en los videos (Figura 8) en el plano sagital, con el fin de delimitar los vídeos a las fases correspondientes al saque con salto, para el posterior procesamiento de las variables cinemáticas.



Figura 8. Ubicación de marcadores en los jugadores en plano sagital

En la Figura 9, se ilustra el área de trabajo del software Kinovea 0.9.3. Por cada vídeo, se generaron las curvas de trayectorias, velocidades y aceleraciones de cada uno de los marcadores (puntos anatómicos de interés para el estudio), así como de movimientos angulares articulares de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo. Luego se procedió a hacer una extracción de datos estructurados y multimedia (videos), provenientes del procesamiento realizado previamente, con la cual se realizó una limpieza de datos, para evaluar la calidad de los datos recopilados y su confiabilidad para formar parte del análisis biomecánico a ejecutar.

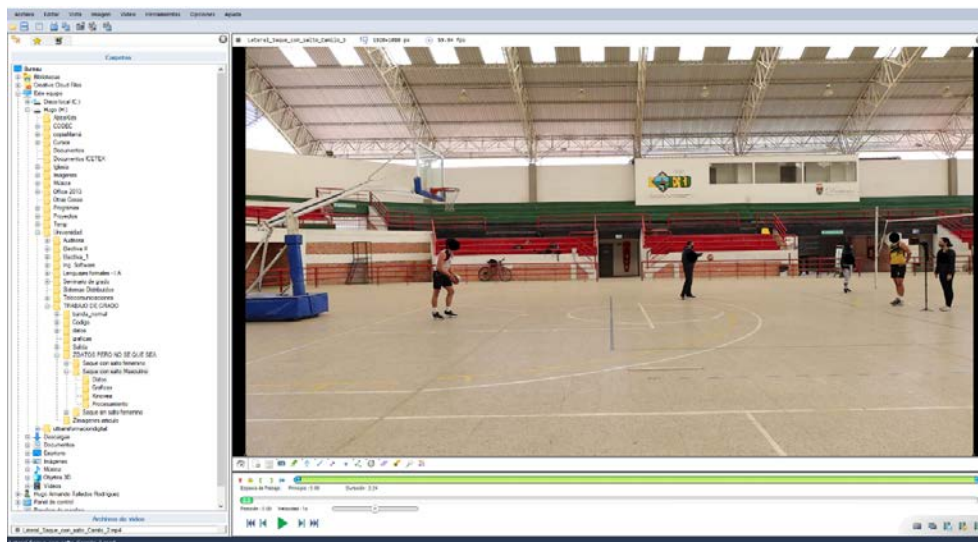


Figura 9. Área de trabajo del software Kinovea 0.9.3

Para la toma de los ángulos interiores de los marcadores capturados se tomó en cuenta la naturaleza de los videos, en los que, algunos ángulos cambian de orientación, pasando de ángulos internos a externos, es por esto que la medición de los ángulos se repartió de la siguiente forma: codo (3 ángulos medidos), hombro (2 ángulos medidos), rodilla (1 ángulo medido), muñeca (1 ángulo medido), tobillo (1 ángulo medido), cadera (1 ángulo medido).

3.4 Procesamiento de datos

El objetivo principal de esta etapa fue la de unificar la información obtenida en el procesamiento de los videos, dado que se contó con varios registros por jugador de un mismo gesto (saque y remate). Como

primer paso, se corrigió el desfase natural de cada uno de los vídeos. Esta falta de sincronización de los movimientos se puede generar por diversos factores, como lo son: Cada vídeo se comienza a procesar en un cuadro y tiempo diferente para el inicio del seguimiento de los marcadores en el software Kinovea, la diferencia entre las velocidades de ejecución del movimiento por parte de cada jugador, la diferencia entre la duración de los fragmentos de video por cada jugador, entre otros. Por lo anterior, el movimiento de cada jugador inicia en diferentes intervalos de tiempo (Figura 10).

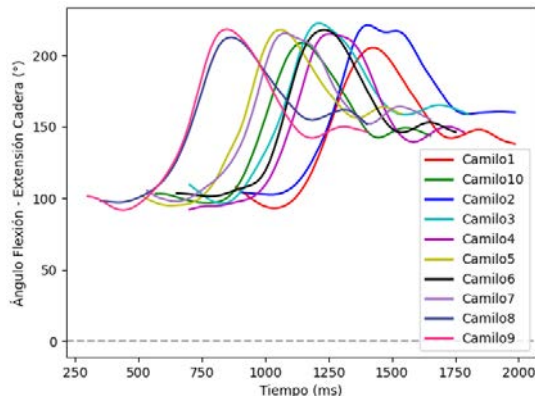


Figura 10. Desincronización en tiempo de videos en la ejecución de saque con salto

A continuación, se explicará el desarrollo para la sincronización y respectiva comparación de los datos con los resultados del procesamiento de movimiento angular, sin embargo, este sirve para las otras métricas mencionadas con anterioridad, como lo son la velocidad angular, velocidad lineal y la trayectoria del jugador. Así mismo, los resultados presentados son pertenecientes al movimiento angular del gesto deportivo de saque con salto desde una perspectiva lateral. Para esto se tomó en cuenta la duración total del movimiento por gesto, tomando el momento inicial de este y restándole a la columna de tiempo (ecuación (1)).

$$T = t_k - t_i \quad (1)$$

Donde T es el tiempo sin el error de desfase, t es la columna de tiempo del gesto deportivo, k hace referencia a la posición que ocupa en la columna de tiempo y t_i es el valor de tiempo en el que el jugador inicia la ejecución del movimiento.

Dado lo anterior se puede observar que cuando k vale 0, T valdría 0. Esto permite que las curvas tengan un mismo inicio y de esta forma poder generar la gráfica del promedio de valores procesados que resulte significativo.

Como siguiente paso a resolver, se tiene la diferencia en la velocidad de ejecución del gesto por parte del jugador, para esto se plantea un cambio de la columna temporal en la que se deje de representar en milisegundos (ms) y pase a porcentaje (ecuación (2)), en la que el cien por ciento representa la duración total del movimiento respectivo (saque o remate) y no la del video analizado, permitiendo así que los gestos que fueron realizados con menor velocidad y que por ende, tienen una duración de tiempo menor, puedan ser comparados con los video de mayor duración.

$$T_{\%} = \frac{100T_k}{T_f} \quad (2)$$

Donde T_f es el tiempo máximo del movimiento.

Con los datos sincronizados y ajustados, se buscó discretizar los valores, con el objetivo de poder realizar un promedio de las diferentes repeticiones del gesto. Para esto fue necesario tener conocimiento de la cantidad de puntos que se busca analizar, para posteriormente hacer uso del caso particular de interpolación general de Newton, la interpolación lineal (ecuación (3)), con la cual se consigue aproximar el valor del ángulo en el porcentaje de tiempo dado, al valor de la función real.

$$f(T_u|T_1; T_2) = f(T_1) + \frac{f(T_2) - f(T_1)}{(T_2 - T_1)} (T_u - T_1) \quad (3)$$

Donde T_u es igual a $100/n$, donde n es la cantidad de puntos que se buscan analizar.

Gracias a la aplicación de la interpolación lineal se logra obtener como resultado una matriz simplificada con la cantidad de puntos calculados, los cuales serán iguales en todos los registros del movimiento. Es decir, si el usuario decide que quiere observar 5 puntos de las curvas de movimiento angular, T_u de la ecuación (3) será igual 20. Finalmente, con los valores de los ángulos calculados en los porcentajes de tiempo indicados, se procedió a realizar un promedio de todas las curvas, teniendo como resultado final la Figura 11.

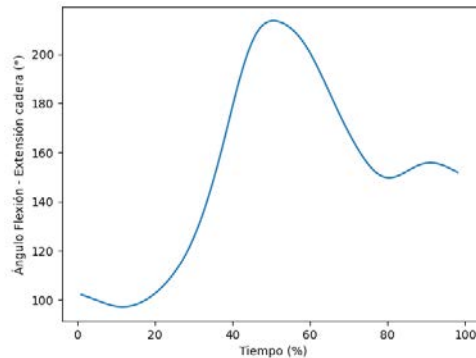


Figura 11. Curva promedio para movimiento de flexo-extensión cadera durante

Como se busca realizar un análisis en el que se pueda determinar cuáles son las causas por las que un jugador no efectúa de manera efectiva un movimiento, del promedio de los ángulos calculados se obtiene la desviación estándar la cual se suma y resta al promedio para así poder obtener una banda de normalidad de cada una de las curvas de interés del gesto estudiado (Figura 12), la cual, con posterioridad se podrá usar para comparar otros jugadores vs los jugadores de este estudio o jugadores con alguna lesión vs los jugadores sanos que son la población de este estudio.

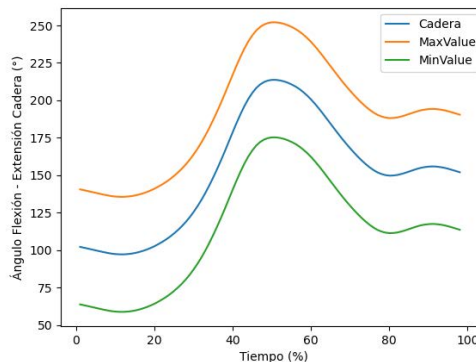


Figura 12. Banda de normalidad para movimiento angular

3.5 Programación

Para el procesamiento de datos se hizo uso de herramientas, tales como el ambiente de desarrollo Anaconda, la cual es una distribución abierta de los lenguajes de programación Python y R [31]. En este caso se implementó la distribución para el lenguaje de programación interpretado Python en su versión 3.8.5, el cual cuenta con múltiples bibliotecas que permiten el manejo y análisis de datos, como lo es Pandas.

Como complemento, para el desarrollo del algoritmo encargado del procesamiento de datos se hicieron uso de librerías que dotan de funcionalidades extra a Python, como lo son: *os*, que es una librería que permite el manejo del sistema operativo, permitiendo ejecutar subprocesos y fragmentos de programas de forma automatizada, así como la creación, eliminación, edición de nombres y cambio de rutas de archivos. *re*, que permite el manejo de expresiones regulares, útiles para poder extraer información como el nombre

del jugador y articulación que se está analizando, los cuales están presentes en los nombres de los archivos creados de forma temporal por el algoritmo. *Mathplotlib* librería usada para la creación de las gráficas necesarias.

Uno de los objetivos principales de la creación del algoritmo, además de la automatización de la creación de bandas normales, es a partir de la abstracción matemática del problema, conseguir un algoritmo que sea capaz de generar promedios, bandas normales y graficas de comparación para cualquier tipo de datos que vengan provenientes del software Kinovea 0.9.3 o cualquier otro que cumpla con la estructura dada por Kinovea y que se encuentre en formato de valores separados por comas (csv).

El algoritmo ofrece un archivo de configuración en el que se pueden cambiar aspectos como, el separador de datos, el símbolo utilizado para los números con puntos decimales, así como poder ingresar el nombre de las cabeceras que se desean analizar. Esto con la finalidad de ofrecer al usuario flexibilidad en el uso del software.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta etapa del proyecto se obtienen como resultado un software el cual es capaz de procesar datos generados por Kinovea 0.9.3 y generar las gráficas de la cinemática del saque y el remate de los jugadores de voleibol, para un primer análisis manual, en el que se pueden observar las trayectorias y velocidades lineales y angulares, así como los movimientos angulares articulares de interés en la biomecánica del voleibol. Las gráficas y resultados presentados a continuación, pertenecen al movimiento angular de saque con salto desde una perspectiva lateral.

4.1 Gráficas por individuo

El algoritmo además de realizar el procesamiento de los datos ofrecidos por Kinovea, dispone de un modo para poder graficar los datos que se tienen. En este caso se usa para poder realizar una revisión de los datos en el que se pueda detectar si existe algún error en el seguimiento de los marcadores, para así poder realizar el promedio y tener la certeza que será un promedio significativo.

En la Figura 13 se observan las diez repeticiones del movimiento angular de cadera producido por un jugador de la población de estudio, en que se puede evidenciar que las gráficas coinciden en magnitudes y forma. Con este tipo de curvas el entrenador puede observar que tan constante es el deportista en la realización de su gesto o si presenta variabilidad, lo que puede afectar la efectividad del mismo.

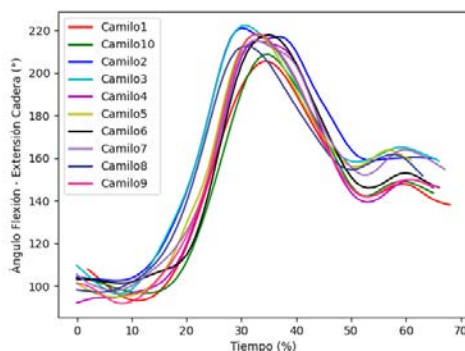


Figura 13. Graficas de repeticiones del movimiento angular de cadera

4.2 Gráficas comparativas

Este mismo método utilizado para la comparación de los datos de un mismo jugador puede ser utilizado para realizar la comparación de graficas de diferentes deportistas, el cual permite tener un primer acercamiento al análisis comparativo requerido por los entrenadores, para evaluar el desempeño de cada uno de sus deportistas, o comparar cualitativamente la ejecución de un movimiento por parte de un deportista amateur y uno élite.

En la Figura 14 se observan las curvas (promedio) de flexión-extensión de cadera durante el saque con salto de los deportistas (Camilo y Mario).

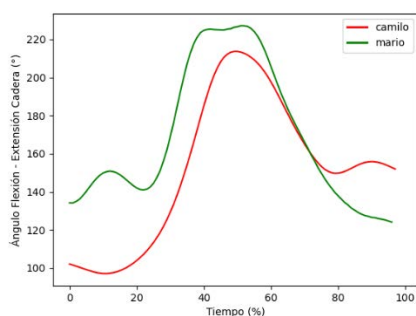


Figura 14. Gráfica comparativa de movimiento angular de cadera

4.3 Gráficas promedio por individuo

Otro de los resultados importantes que se lograron fue la posibilidad de obtener de un registro grande de datos una curva promedio. En este caso la Figura 15 muestra las gráficas promedio por individuo del movimiento angular de las extremidades: codo, hombro, cadera, rodilla y tobillo. Así mismo, se calcula la desviación estándar de cada curva para así poder obtener un máximo y un mínimo de los movimientos.

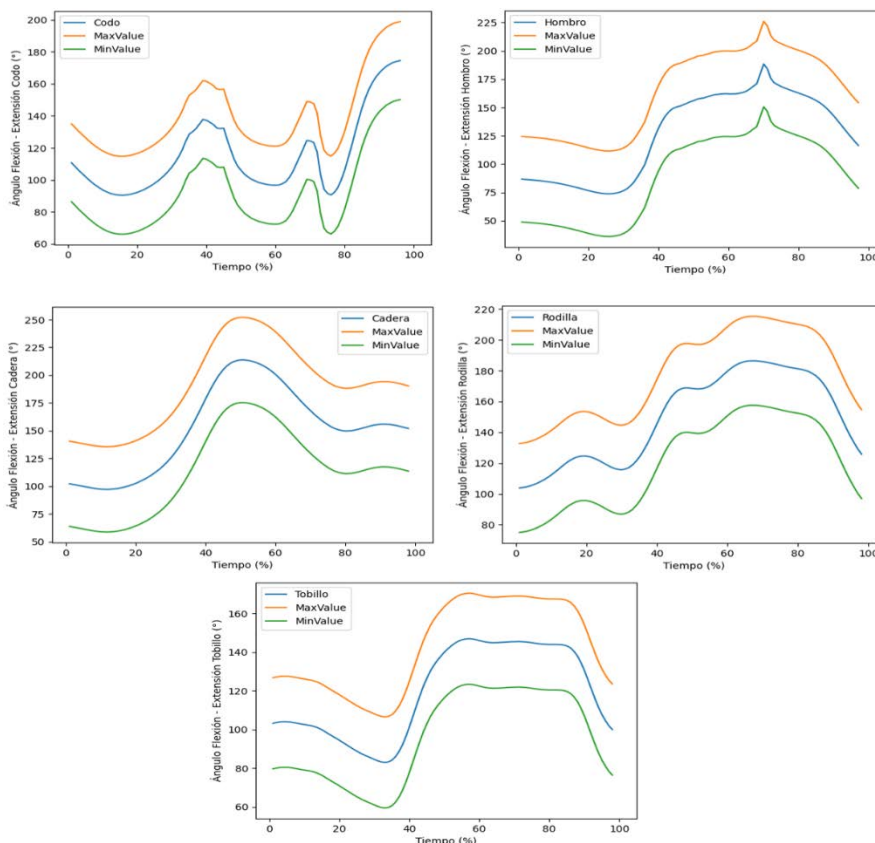


Figura 15. Gráficas promedio por extremidad de movimiento angular con máximos y mínimos

Es importante hacer la aclaración que, por la abstracción lograda del problema, el algoritmo es capaz de obtener estas mismas curvas para velocidad lineal y velocidad angular, sin embargo, para facilidad del lector solo se expone el caso de movimiento angular, que es fundamental en la evaluación biocinémica de los movimientos de saque y remate.

4.4 Gráficas promedio por grupo poblacional (mujeres-hombres)

Finalmente, al realizar el procedimiento de manera repetitiva y con cada jugador de la población, es posible obtener un promedio femenino y promedio masculino de cada una de las extremidades capturadas en los

videos. En este caso se muestra el promedio del movimiento angular de cadera obtenido para la muestra femenina y masculina del estudio (Figura 16).

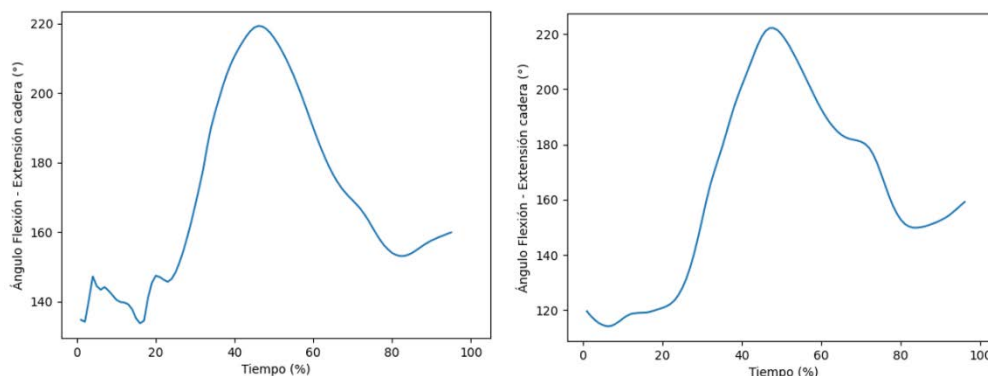


Figura 16. Gráficas de promedio masculino y femenino para movimiento angular de cadera

5. CONCLUSIONES

El algoritmo diseñado para la sincronización del tiempo en los ciclos de saque y remate de los vídeos resultó ser efectivo para poder garantizar una correcta comparación de la biocinemática de los jugadores al momento de generar las diferentes curvas promedio tanto de cada deportista como del promedio de los grupos poblacionales. Esto se puede evidenciar al comparar las gráficas por individuo (Figura 13) con la gráfica promedio del jugador (Figura 15).

Aunque el estudio todavía no otorga una herramienta totalmente automatizada para la detección de fallos en la ejecución de los movimientos, sí brinda las gráficas necesarias para un análisis manual-visual y cuantitativo por parte del entrenador, como lo son las gráficas promedio por deportista y por grupo de deportistas, que resultan útiles en la evaluación de la técnica de los deportistas y de esta forma permitir a los entrenadores diagnosticar junto con los vídeos de Kinovea, las causas de éxito o de falla en los gestos de saque y de remate en cada jugador.

Con estas curvas generadas, se pueden realizar diferentes análisis tales como, la constancia en la técnica de ejecución de cada deportista, la incidencia del tiempo de entrenamiento en la calidad de ejecución de los movimientos, qué tanto afecta la antropometría de cada deportista en la ejecución de su gesto deportivo vs otro deportista con otra contextura física, qué movimientos inesperados o ineficientes realiza un deportista y cómo afecta la cinemática y eficiencia de su movimiento, etc.

La metodología y el algoritmo desarrollado en este estudio es muy versátil y permite generar diferentes curvas cinemáticas, lo que facilita la realización de comparaciones de gestos deportivos, por lo que se planea utilizar a futuro para estudiar, evaluar y diagnosticar particularidades de otros deportes como baloncesto, rugby, fútbol, patinaje, etc.

REFERENCIAS

- [1] B. Rodríguez and A. Monroy, "La técnica y la táctica en el voleibol," EFDeportes.com, pp. 1-9, 2013.
- [2] P. C. Ureña, E. A.; CALVI, F. M.; LOZANO, "Incorporacion del jugador libero a study of serve reception in the top-level of spanish male volleyball after the," *Rev. Int. Med. y Ciencias la Act. Física y el Deport.*, vol. 2, no. 4, pp. 37-49, 2002.
- [3] E. Palao, J. M, Hernández, "Formas de utilización de la estadística en voleibol. Estudio sobre Superliga Masculina y Femenina," 2012.
- [4] E. Palao, J.M, Hernández, Formas de utilización de la estadística en voleibol. Estudio sobre Superliga Masculina y Femenina. Murcia: Universidad Católica de San Antonio, 2012.
- [5] F. Investiga, "Cómo se toman los datos en el deporte y por qué es necesario el valor agregado de un especialista para procesarlos, analizarlos y presentarlos," 2019.
- [6] C. Castro González, "Tratamiento Inteligente de datos en la Actividad Deportiva y la Salud," Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología Universidad de La Laguna, 2020.

- [7] J. N. García Giménez, M. B. Díaz Agudo, and J. A. Recio García, "Visualización de datos y personalización inteligente de explicaciones para su utilización en la medicina del deporte," 2018.
- [8] G. Press, "Cleaning Big Data: Most Time-Consuming, Least Enjoyable Data Science Task, Survey Says," *Forbes Tech*, pp. 4–5, 2016, Recuperado: <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2016/03/23/data-preparation-most-time-consuming-least-enjoyable-data-science-task-survey-says/#63438b8b6f63>
- [9] R. Rein and D. Memmert, "Big data and tactical analysis in elite soccer: future challenges and opportunities for sports science," *Springerplus*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [10] O. Cardona and Y. Román Chalarca, "Análisis biomecánico de la ejecución técnica del gesto remate en el equipo menores femenino perteneciente a la liga resaraldense de voleibol," *J. Teknol.*, vol. 1, no. 1, p. 95, 2013.
- [11] J. Quintana Salas, "Técnica Y Efectividad Biomecánica Del Remate En El Voleibol. Revisión Bibliográfica," *J. Mov. Heal.*, vol. 16, no. 1, 2020, art85.
- [12] J. Peña, D. Moreno-Doutres, J. Coma, M. Cook, and B. Buscà, "Anthropometric and fitness profile of high-level basketball, handball and volleyball players," *Rev. Andaluza Med. del Deport.*, vol. 11, no. 1, pp. 30–35, 2018.
- [13] S. Carrero Pajares, C. Fernández Echeverría, F. Claver Rabaz, J. González Silva, and M. Moreno Arroyo, "Caracterización de la recepción en voleibol en categoría juvenil, en función de la intensidad del set," *Rev. Ciencias del Deport.*, vol. 11, no. 3, pp. 183–184, 2015.
- [14] F. Escolano, "Inteligencia artificial: Modelos, técnicas y áreas de aplicación". 2003.
- [15] S. Parsons, "Introduction to Machine Learning" (Adaptive Computation and Machine Learning). 2004.
- [16] E. A. Oviedo Carrascal, A. I. Oviedo Carrascal, and G. L. Velez Saldarriaga, "Minería multimedia: hacia la construcción de una metodología y una herramienta de analítica de datos no estructurados," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 16, no. 31, pp. 125–142, 2017.
- [17] J. M. Delgado, "Desarrollo de un prototipo virtualizado de computación de alto desempeño (hpc) para la analítica de datos," Institución Universitaria Politécnico Gran Colombiano, 2014.
- [18] D. J. Hand and N. M. Adams, "Data Mining. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online," John Wiley Sons, Ltd, p. 7, 2015.
- [19] K. Mayer-Schönberger, Viktor & Cukier, Big Data. "La revolución de los datos masivos". 2013.
- [20] C. Perez Lopez and D. Santin Gonzales, "Minería de datos. Técnicas y herramientas: Técnicas y herramientas". Madrid: Thomson, 2008.
- [21] T. Balagueró, "¿Qué son los datasets y los dataframes en el Big Data?," Deusto Formación, 2018.
- [22] Y. C. Fung and R. Skalak, "Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues", vol. 103, no. 4. 1981.
- [23] M. Amadio, C., Serrao, J., Costa, P., Sacco, I., Araujo, R., Mochizuki, L., Duarte, "Introdução à Biomecânica para análise do movimento humano: descrição e aplicação," pp. 41–54, 1999.
- [24] M. Izquierdo, "Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte". Madrid: Editorial Médica Panamericana, 2008.
- [25] M. Gutiérrez, "Fundamentos de biomecánica deportiva". Madrid: Editorial Síntesis, 2015.
- [26] Y. Torres-pérez and O. Jiménez, "Generated Graphical Interface Design of the Normality Bands of the 2D Equine Kinematics," *Rev. Argentina Bioingeniería*, 20, vol. XX, no. 1, pp. 39–42, 2014.
- [27] V. Cerrato, P. Andrés, J. Manuel, and B. Frutos, "Mechanics of the Spike Execution in Volleyball," *Mov. Hum.*, vol. 5, pp. 33–51, 2013.
- [28] M. Juan, "El saque en voleibol, una técnica imprescindible en este deporte," 2020.
- [29] A. Orozco, "Machine learning y su importancia en la actualidad," *El Univers.*, 2019, Recuperado: <https://www.eluniversal.com.mx/opinion/arturo-orozco/machine-learning-y-su-importancia-actual>
- [30] MINTIC, "El 1,8% de las empresas en Colombia utiliza Inteligencia Artificial," *Radio Santa Fe*, 2018.
- [31] A. Kadiyala and A. Kumar, "Applications of Python to evaluate environmental data science problems," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 1580–1586, 2017.

Extracción de características Histograma de Gradientes Orientados HOG para la identificación de vehículos en imágenes usando Máquina de Soporte Vectorial SVM

Ricardo Alirio González Bustamante¹

Carolina Acevedo Nanclares²

Alexander Marroquín Ospina³

Sandra Milena García Ávila⁴

Paola Andrea Mateus Abaunza⁵

¹⁻³ *Fundación Universidad Autónoma de Colombia*

^{4,5} *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*
Colombia

Dentro de sus múltiples etapas, la visión por computador requiere el reconocimiento de objetos y su posterior clasificación. En este capítulo se evalúa el rendimiento de un clasificador basado en una Máquina de Soporte Vectorial SVM y características de Histograma de Gradientes Orientados HOG, se comparan los resultados al entrenar el clasificador con imágenes segmentadas y sin segmentar; de igual manera se confrontan los resultados para los Kernels: Lineal, Polinomial, Gaussiano y RBF. Todo el proceso de extracción de características, entrenamiento de la máquina de soporte y evaluación del modelo se realiza en Matlab. Para el entrenamiento y pruebas de la SVM se usa imágenes de uso libre para investigación recolectadas por el grupo de tratamiento de imágenes GTI de la Universidad Politécnica de Madrid, España, que tienen un tamaño de 64x64 píxeles y están divididas en dos clases: vehículos (muestra positiva) y no-vehículos (muestra negativa). De cada clase se extrae el 60% de las imágenes para el entrenamiento y el 40% para pruebas; luego se les extrae las características usando el histograma de gradiente orientado HOG, como parámetro de configuración se utiliza un tamaño de celda de HOG 8x8, suficiente para identificar visualmente el vehículo; las características extraídas son normalizadas en vectores y con ellos se realiza el entrenamiento de la máquina de soporte vectorial SVM. Para realizar las pruebas las imágenes se ingresan al modelo SVM entrenado anteriormente. Los resultados permiten concluir que, por sus características, el conjunto de datos de GTI de tamaño 64x64 no requiere proceso de segmentación. El clasificador entrenado con las imágenes sin segmentar presenta mejores resultados. El kernel polinomial mostró el mejor rendimiento con una precisión de 99.3%, exactitud del 94.6% y especificidad del 99.1% con imágenes no segmentadas.

¹ Contacto: gonzalez.ricardo@fuac.edu.co

² Contacto: carolina.acevedo@fuac.edu.co

³ Contacto: alexander.marroquin@fuac.edu.co

⁴ Contacto: sandra.garcia@unad.edu.co

⁵ Contacto: paola.mateus@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI ha sido declarado el siglo urbano y en ninguna parte esto es tan cierto como en América Latina y el Caribe, la región más urbanizada del mundo. Más del 80% de la población de la región vive en ciudades y centros urbanos, que van desde ciudades pequeñas e intermedias hasta cinco megaciudades con poblaciones que superan los 10 millones de personas: São Paulo, Ciudad de México, Buenos Aires, Río de Janeiro y Lima, a las que se unirá Bogotá antes del año 2030 [1].

América Latina y el Caribe no solo es la región más urbanizada, sino también la más desigual del mundo y el transporte no es una excepción. Si bien las nuevas clases medias se han unido a los ricos en el uso de automóviles privados, contribuyendo a una mayor congestión y contaminación, la mayoría de los residentes de la región dependen del transporte público y la movilidad activa, usualmente en condiciones muy deficientes [1].

El problema de la congestión del tráfico en las ciudades metropolitanas en desarrollo se puede clasificar generalmente en dos problemas principales: la congestión del tráfico basada en el volumen y el comportamiento. La congestión basada en el volumen es el resultado del elevado volumen de vehículos en las redes de carreteras con servicios de transporte público deficientes y unas instituciones de transporte y gestión del tráfico ineficientes. Por otro lado, la congestión basada en el comportamiento es causada por la falta de disciplina en los agentes de carretera, como los conductores, peatones e incluso los agentes de tránsito [23].

Bogotá por ejemplo tiene un alto flujo vehicular, y tiempos de viaje que superan el promedio de las ciudades de América latina; su parque automotor va en crecimiento, según el registro Distrital de automotores hay 1.951.592 vehículos particulares en la ciudad, esta cifra con corte a 31 de diciembre del 2020 [2].

En busca de soluciones a la congestión se plantean por parte de los entes de gobiernos, medidas como el pico y placa, y cobros por congestión; sin embargo, una solución novedosa que se ha venido implementando en otros países es el control de tráfico usando visión artificial. [23] sobre este tema se han realizado varias investigaciones. La visión por computadora también es conocida como visión artificial [3] y considerada una rama de la Inteligencia Artificial clásica [4]. La visión artificial consiste en realizar diferentes procesos basados en algoritmos y cálculos matemáticos automatizados que permitan el procesamiento de imágenes y datos con el fin de que un computador logre identificar en las imágenes rasgos, de manera similar a como lo hace un ser humano [24], aun cuando el procesamiento de video presenta dificultades por capturas anómalas.[26] El concepto de control de tráfico y toma de decisiones automáticas va encaminado hacia lo que se conoce como ciudades inteligentes.

Las ciudades inteligentes deben estar conectadas a través TIC para ayudar en la evaluación y selección de diferentes criterios que permitan optimizar el flujo continuo de estas y facilitar el desarrollo urbano, mejorando significativamente la calidad de vida de los ciudadanos [5].

El reconocimiento de objetos es una técnica de visión artificial para identificar objetos en imágenes o videos. El reconocimiento de objetos constituye una salida clave de los algoritmos de aprendizaje profundo y aprendizaje automático. Las técnicas de aprendizaje profundo se han convertido en un método habitual para llevar a cabo el reconocimiento de objetos. Se emplean modelos de aprendizaje profundo, tales como las redes neuronales convolucionales, CNN, para aprender automáticamente las características inherentes de un objeto a fin de identificarlo. También existen técnicas aprendizaje automático habituales en el reconocimiento de objetos que ofrecen enfoques diferentes a los de aprendizaje profundo [6]. Algunos ejemplos de técnicas de aprendizaje automático son:

- Extracción de características HOG con un modelo SVM de aprendizaje automático [6].
- Modelos como el bag-of-words, (bolsa de palabras), que se han empleado ampliamente en la clasificación de imágenes [19], características robustas aceleradas (SURF), algoritmo de visión por computador, capaz de obtener una representación visual de una imagen y extraer una información

detallada y específica del contenido y Regiones Externas Máximamente Estables MSER, que es un detector de características que extrae de una imagen una serie de regiones covariantes, llamadas MSER. Un MSER es un componente conectado estable de algunos conjuntos de niveles de la imagen MSER [6, 19]. Otro método altamente utilizado es el algoritmo Viola-Jones, que se puede utilizar para reconocer una serie de objetos, incluidas caras y torsos [6, 20].

En este trabajo se propone el uso de Matlab para realizar la extracción de características HOG y con el vector resultante realizar el entrenamiento de un clasificador usando diferentes tipos de Kernels para determinar cuál de estos brinda un mayor nivel de confianza en la clasificación. Con el fin de realizar la identificación de vehículos.

2. MÉTODO

2.1 Conjunto de datos

Para el entrenamiento y pruebas del clasificador se utilizó un conjunto de imágenes con tamaño 64x64 píxeles, el dataset es propiedad Universidad Politécnica de Madrid del Grupo de Tratamiento de Imágenes GTI, están disponibles de manera abierta para uso de investigación y se puede descargar en [17, 25].

Este dataset contiene un total de 12017 imágenes, de estas 6942 corresponde a imágenes de vehículos tomadas desde la parte trasera y en diferentes condiciones de iluminación, que corresponde a la muestra positiva, las imágenes restantes 5075 son partes de carretera, puentes, separadores viales y diversas escenas de tráfico que no contienen vehículos y representan la muestra negativa. De cada una de las muestras, positivas y negativas, fue extraído el 60% de las imágenes para realizar el entrenamiento y el 40% para realizar las pruebas al clasificador. En la Figura 1 se presenta algunas muestras de estas imágenes.



Figura 1. Imágenes de muestra

2.2 Esquemas generales del proyecto

En la Figura 2 se observa el esquema de clasificador sin realizar el proceso de segmentación al conjunto de imágenes, se tienen entradas de entrenamiento y pruebas cada una con objetos de interés, para muestra positiva los vehículos y para la muestra negativa imágenes de carretera.

A cada una de esas imágenes se les extrae las características de Histograma de Gradientes Orientados construyendo para cada imagen un vector de entrenamiento y generando una etiqueta, estas características son usadas para realizar el entrenamiento de la SVM que posteriormente dará un resultado de 1 para la clase positiva y 0 para la clase negativa al ingresar imágenes de prueba. Los resultados del clasificador se evaluarán de acuerdo con su matriz de confusión y generando las curvas características operativas del receptor ROC [21].

En la Figura 3 se puede observar el esquema del clasificador realizando el proceso de segmentación, el procedimiento es similar al descrito para el esquema anterior, la diferencia está en que para este caso se agrega la etapa de segmentación en la cual se realiza el cambio de color a escala de grises y se realiza la binarización a cada una de las imágenes. Los resultados del clasificador se evalúan de igual manera de acuerdo con la matriz de confusión y la gráfica de las curvas de ROC.

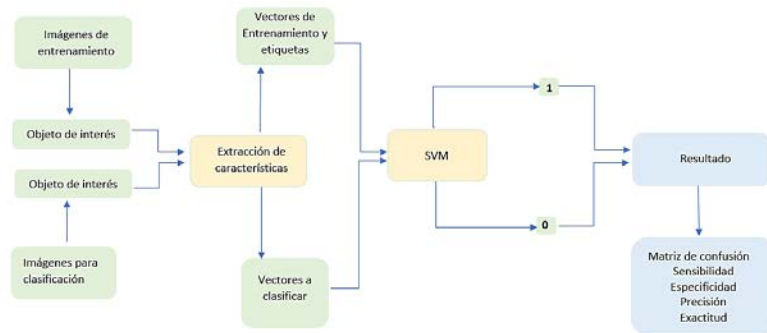


Figura 2. Esquema general del proyecto sin aplicar segmentación

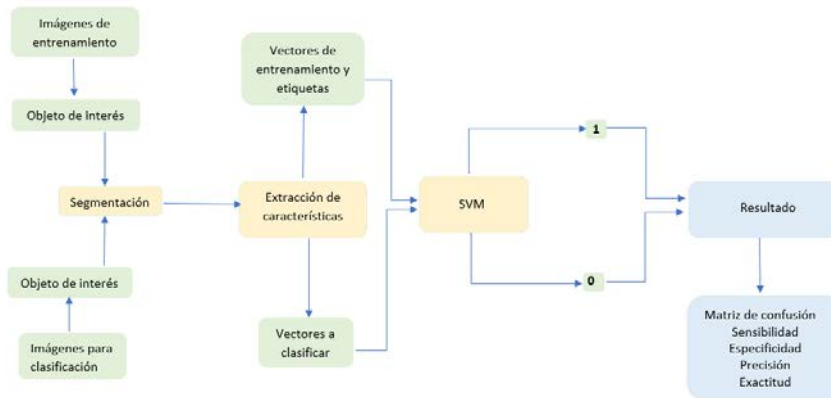


Figura 3. Esquema general del proyecto aplicando segmentación

En la Figura 4 se muestra el esquema de segmentación, en donde se toman las imágenes de entrada vehículos y no vehículos y se realiza cambio a escala de grises y binarización, para cada clase se tendrá la salida segmentada.

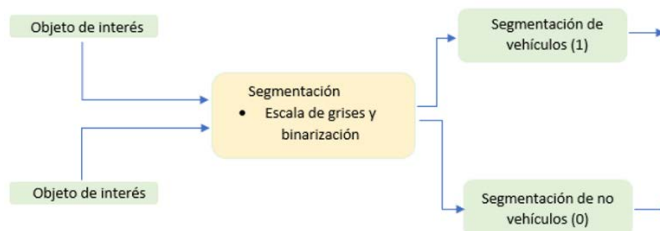


Figura 4. Esquema de segmentación

En la Figura 5 se observa el proceso de extracción de características, en donde se toman las imágenes del dataset GTI; para la clase vehículos y no vehículos se separó el 60% de las imágenes del dataset para entrenamiento de la máquina de soporte vectorial, el 40% restante de las imágenes de cada clase vehículos y no vehículos se usa para pruebas, luego se procede a extraer las características HOG, como resultado se tienen los vectores de entrenamiento y pruebas para cada clase.

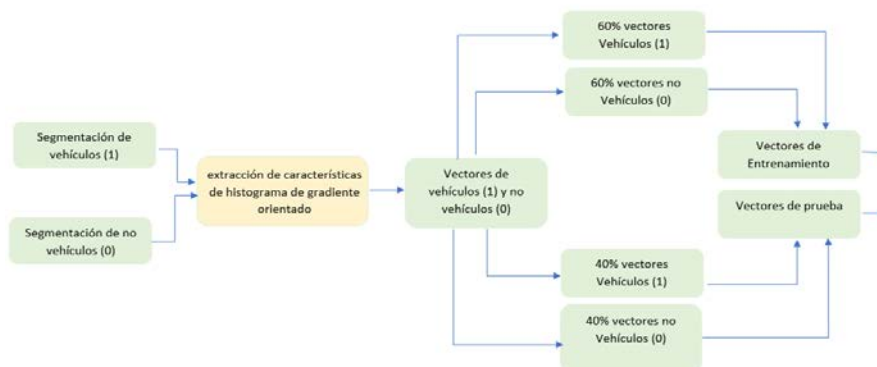


Figura 5. Esquema extracción de características

En la Figura 6 se visualiza el esquema de la máquina de soporte vectorial, como entrada se tienen los vectores de entrenamiento y pruebas, a la SVM se le aplica diferentes funciones de Kernels, sus resultados serán evaluados de acuerdo con la matriz de confusión y las curvas de ROC.

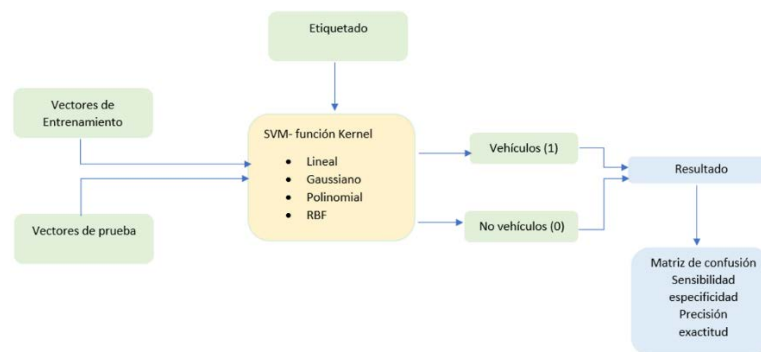


Figura 6. Esquema Máquina de soporte vectorial

2.3 Segmentación y binarización

La segmentación subdivide una imagen en sus regiones u objetos constituyentes, de tal manera que los píxeles de esas regiones posean propiedades o atributos similares, como niveles de gris, contraste o texturas. El proceso de segmentación se encarga de evaluar cada píxel de la imagen y decidir si contiene o no las características de interés. Como resultado, este método genera una imagen binaria, donde los píxeles que pertenecen al objeto se representan con un '1' (objeto en primer plano), mientras que los que no pertenecen al mismo se representan con un '0' (fondo). La decisión de pertenencia de un píxel a uno u otro segmento se basa en el análisis de alguna característica de la imagen, como por ejemplo los niveles de intensidad o la textura [7].

Binarización: Es una técnica que consiste en la realización de un barrido en la matriz de la imagen digital, por medio de bucles o recursividad, con el fin de que el proceso produzca la reducción de la escala de grises a dos únicos valores. Negro (= 0) y blanco (= 255), o lo que es lo mismo, un sistema binario de ausencia y presencia de color 0-1. La comparación de cada píxel de la imagen viene determinada por el umbral de sensibilidad (valor $T = \text{Threshold}$). Por ejemplo, los valores que sean mayores que el umbral toman un valor 255 (blanco) y los menores 0 (negro). La binarización de fotografías es muy utilizada en la reproducción de imágenes y en la visión artificial [8].

2.4 Extracción de características HOG

La extracción de características es un método que toma una imagen como entrada y extrae atributos de interés de esta, como pueden ser coordenadas de objetos que cumplan ciertas características, detección de curvas y formas, etiquetado de componentes, entre otros. La extracción de características entra de lleno en el campo del análisis de imágenes constituyendo la primera etapa en la inteligencia de un sistema de visión artificial. La extracción de información de interés que contiene una imagen constituye actualmente un inmenso campo de estudio e investigación, que abarca multitud de aplicaciones. Las áreas que abarcan el estudio del análisis de imágenes son tan variadas como la informática, la física, la fotogrametría y las matemáticas, entre otros [7].

Particularmente la extracción de HOG pretende distinguir el tamaño y la forma del objeto de interés, normalmente la distribución de gradientes de intensidad local o direcciones de borde permiten caracterizar la imagen original de manera confiable, incluso sin un conocimiento preciso del gradiente o las posiciones de borde correspondientes.

En la práctica, esto se implementa dividiendo la ventana de la imagen en pequeñas regiones espaciales o celdas, para cada celda que acumula un histograma I-D local de direcciones de degradado u orientaciones de borde sobre los píxeles de la celda. Las entradas combinadas del histograma forman la representación de la imagen original [9].

2.4.1 Cálculo de gradiente

Para el cálculo del vertical y horizontal de un píxel $p = (x, y)$ de una imagen I se obtiene con la ecuación (1) y ecuación (2) respectivamente.

$$d_x = I(x + 1, y) - I(x - 1, y) \quad (1)$$

$$d_y = I(y + 1) - I(x, y - 1) \quad (2)$$

Para el cálculo de la magnitud y la posición del gradiente se tiene $\theta = (x, y) = \text{arccotan}\left(\frac{dy}{dx}\right)$ y $g(x, y) = \sqrt{dx^2 + dy^2}$, respectivamente [10].

2.4.2 Cálculo del histograma

El cálculo del histograma se realiza como lo describe en [10]. Se divide la imagen de entrada I en celdas de 8×8 , píxeles cada uno como se muestra en la Figura 7a para la imagen de un rostro. Luego, se divide la orientación entre 0° y 180° en 9 intervalos, como se muestra en la Figura 7b, y se calcula del valor para el histograma h en el intervalo k , $h(k)$, acumulando los gradientes de la celda C usando la ecuación (3).

$$h(k) = \sum_{(x,y) \in C} w_k(x, y) g(x, y) \quad (3)$$

Donde $K = 1, 2, \dots, 9$ $w_k(x, y) = 1$ si $20 * (k - 1) \leq \theta(x, y) < 20 * k$ y $w_k(x, y) = 0$ en caso contrario; luego de esto se concatenan los histogramas de cada celda dentro de un bloque de 2×2 celdas, obteniendo así el vector $V' = (h_1, \dots, h_4)$ donde $h_i, i = 1, 2, 3$ y 4 denotan el histograma de la celda i en un bloque dado (figura 7c). Luego se normaliza el vector V' usando la norma L_2 obteniendo el vector V . Finalmente, para obtener el vector HOG unidimensional se concatenan todos los vectores normalizados en V en el nuevo vector $X = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ donde n es el número total de bloques en un parche I . Con estas configuraciones la longitud de una imagen HOG de 64×64 píxeles es 1764 [10].

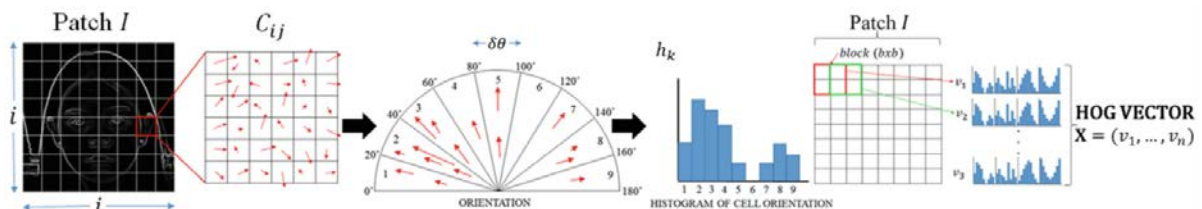


Figura 7. Proceso extracción de histograma de características de HOG [10]: a) I de entrada dividida 8×8 , b) Dirección del gradiente, y c) Histograma de la celda en el bloque

El tamaño de la celda HOG de un nivel es definido como la aplicación de HOG con una densidad específica de cuadrícula, esto es, con un tamaño de celda específico, pero sin agruparse en bloques. Cuando se aplica una cuadrícula densa se obtiene información más detallada del objeto, mientras que, para una cuadrícula amplia o espaciada, se obtiene información general de la estructura del objeto [11, 18].

En la Figura 8 puede verse que al variar el parámetro de tamaño de celda HOG cambia la cantidad de información de forma codificada en el vector de características, el tamaño de celda 2×2 y 4×4 codifica demasiada información y aumentan el tamaño del vector de características, esto influye negativamente en el tiempo de entrenamiento del clasificador. El tamaño de celda 8×8 extrae información suficiente para identificar el vehículo, por lo que se utiliza la celda 8×8 como parámetro de configuración HOG.

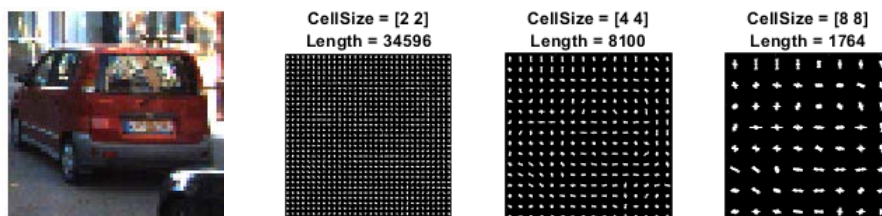


Figura 8. Tamaño de celdas: a) imagen de prueba, b) celdas 2×2 , c) celdas 4×4 , y d) celdas 8×8

Debido a que todas las imágenes de entrenamiento tienen las mismas dimensiones, sus vectores de características HOG tienen la misma longitud y se pueden usar para entrenar una SVM, por lo tanto, el preprocesamiento no es necesario; sin embargo, convertir las imágenes a ciertos espacios de color podría aumentar potencialmente el rendimiento del detector [12]. Teniendo en cuenta lo anterior se realiza el entrenamiento de la máquina de soporte vectorial para imágenes segmentadas y sin segmentar con el fin de evaluar cual presenta un mejor rendimiento.

2.4.3 Clasificador usando Máquina de soporte Vectorial SVM

Las máquinas de soporte vectorial SVM son modelos supervisados de aprendizaje que cuentan con diferentes algoritmos que permiten su aplicación en problemas de clasificación y regresión, usualmente las SVM son utilizadas para el análisis de datos y reconocimiento de características. Para realizar la clasificación de datos, este tipo de máquinas permite separar entre diferentes clases [13].

SVM utiliza funciones lineales en un espacio de características de alta dimensión. Está entrenada basada en un estudio aritmético que se deriva de la teoría de la optimización introducida por Vapnik [14]. Al usar la SVM para resolver problemas de clasificación binaria se requieren ejemplos de cada una de las clases se requiere separar, para el caso de este artículo imágenes de vehículos y no vehículos.

La máquina se entrena a partir del conjunto de ejemplos de entrenamiento, esta aprende la superficie de decisión de dos clases distintas a partir de los puntos de entrada y construye un modelo que predice la clase a la cual pertenece cada nueva muestra que se ingresa (imágenes de prueba). La SVM construye un hiperplano, o conjunto de ellos, en un espacio de una alta dimensión, cuando las nuevas muestras se ponen en correspondencia con dicho modelo, en función de su proximidad pueden ser clasificados en una u otra clase. Una buena separación entre las clases permitirá una correcta clasificación [11]. En la Figura 9 se muestra la división de dos conjuntos de datos de dos clases, separados por un hiperplano separador (w, b).

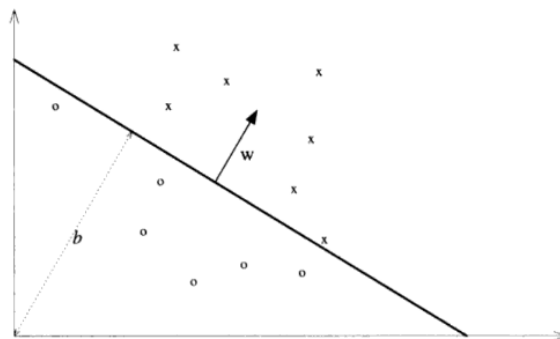


Figura 9. Separador hiperplano para un conjunto de entrenamiento bidimensional [14]

El caso más sencillo de clasificación binaria se presenta cuando se trabajan dos muestras linealmente separables, para ejemplos no linealmente separables, donde las SVM demuestran su gran potencialidad se introducen las funciones kernel que hace que las SMV sean aplicables para cualquier conjunto de datos.

Los métodos kernel son una familia de algoritmos cuyo elemento común y pieza fundamental en todos es la función kernel, su utilidad en el análisis de datos reside en la representación de la información. Este tipo de métodos presentan la ventaja de que son aplicables a cualquier tipo de datos, además se pueden aplicar algoritmos lineales y obtener con ellos soluciones no lineales. Las representaciones Kernel ofrecen una solución alternativa al proyectar los datos en un espacio de características de alta dimensión para aumentar la potencia de cálculo de las máquinas de aprendizaje lineal.

La ventaja de utilizar las máquinas en la representación dual deriva del hecho de que, en esta representación, el número de parámetros ajustables no depende del número de atributos que se utilizan. Al reemplazar el producto interno con una función de kernel elegida apropiadamente, se puede realizar implícitamente una función no lineal a un espacio de características de alta dimensión sin aumentar el número de parámetros ajustables, siempre que el núcleo calcule el producto interno de los vectores de

características correspondientes a las dos entradas. Por tanto, el problema consiste en elegir un kernel adecuado para la SVM. El principal interés de los kernel, en el contexto de SVM, es que lo que se ha visto en el caso de separación lineal también se aplica fácilmente a la separación no lineal mediante su uso. [15]

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de dos clases representadas con puntos que requieren ser clasificados. El Kernel de función de base radial RBF es más adecuado que el lineal en una SVM.

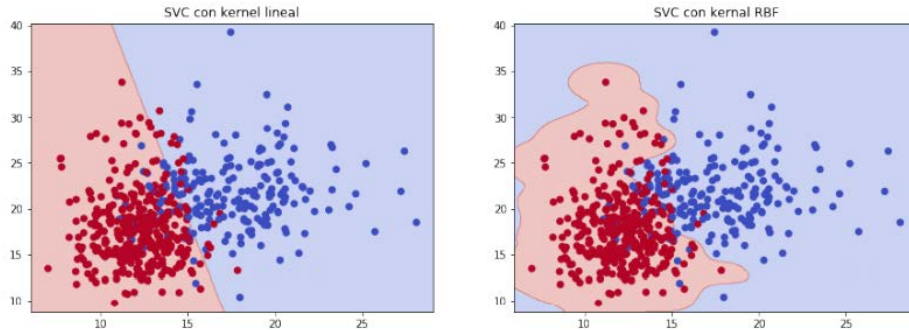


Figura 10. Ejemplo clasificación de clase kernel lineal y RBF [15]

Los siguientes son los cuatro Kernel básicos:

1. *Lineal*. La ecuación (4) es la expresión para el cálculo de kernel lineal.

$$K(x_i, x_j) = x_i^T X_j \quad (4)$$

2. *Polinomial*. La ecuación (5) corresponde a una proyección de $\phi(x)$ en un espacio de características donde cada componente $\phi_i(x)$ es un producto de componentes de x con grado menor que d , es decir, un monomio. El separador calculado a partir de este kernel es un polinomio de grado d , cuyos términos son las componentes de x . En definitiva, la función ϕ asociada a dicho kernel lleva a cada vector de entrada en un vector con todos los posibles monomios de grado d , para el primer caso, o a vectores compuestos por todos los monomios de grado menor o igual a d , en el segundo. [15][16]

$$K(x, z) = (x * z + c)^d \quad (5)$$

3. *Función de base radial RBF*. La ecuación (6) es la expresión para el cálculo de kernel RBF.

$$k(x_i, x_j) = \exp(-\gamma |x_i - x_j|^2), \gamma > 0 \quad (6)$$

Donde γ, r y d son parámetros del Kernel [16].

4. *Kernel de base radial gaussiana*. La ecuación (7) Corresponde a una proyección en un espacio de dimensiones finitas. El kernel gaussiano tiene la peculiaridad de que $k(x, x) = e^0 = 1 \forall x \in X$, luego $\|\phi\| = 1$. Además, $k(x, z) > 0$ para todo $x, z \in X$ esto nos lleva a que el ángulo entre cualquier par de imágenes es menor que $\frac{\pi}{2}$, de forma que las imágenes de los vectores del espacio de entrada caen dentro de una región restringida del espacio de características [15].

$$k(x, z) = e^{-\frac{\|x-z\|^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados del clasificador basado en SVM y HOG de imágenes segmentadas y sin segmentar para un conjunto de 4808 imágenes tomada del Dataset GTI las cuales se usaron para entrenamiento y pruebas, después de realizar el entrenamiento con cuatro funciones de kernel diferentes (lineal, polinomial, gaussiano y RBF).

El desempeño del clasificador implementado se presenta a través de curvas de funcionamiento para su análisis y comparación y sus respectivas matrices de confusión.

En la literatura se utilizan dos metodologías principales para la evaluación de clasificadores binarios: Compensación del Error de Detección DET y Característica de Operación del Receptor ROC. Ambas metodologías son curvas de funcionamiento que grafican la comparación de dos tipos de errores de clasificación: razón de falsa aceptación (falsos positivos) contra razón de falso rechazo (falsos negativos), en alguna de sus variantes. Las gráficas pueden ser utilizadas para analizar el funcionamiento de un detector o para fijar el punto de operación que mejor conviene. Esto se logra mediante la generación de varios puntos de operación en una curva al variar un parámetro que controla la tasa de falsos positivos. En este caso se trata del umbral del clasificador SVM. En general, al disminuir la razón de falso rechazo se aumenta la de falsa aceptación y viceversa [22].

3.1 Imágenes sin segmentar

La Tabla 1 muestra el rendimiento del clasificador SVM usando distintas funciones de Kernel para el conjunto de datos de pruebas con imágenes sin segmentar.

Tabla 1. Resultados de la evaluación del modelo con imágenes sin segmentar

	TN	FP	FN	TP	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	Exactitud
LINEAL	1999	32	352	2425	87%	98%	98,7%	92,0%
GAUSSIANO	2019	12	281	2496	90%	99%	99,5%	93,9%
POLINOMIAL	2013	18	242	2535	91%	99%	99,3%	94,6%
RBF	2019	12	280	2497	90%	99%	99,5%	93,9%

Para la precisión del clasificador se obtuvo como resultado que para el kernel gaussiano y el RBF se presenta una precisión del 99.5% superando 0.2 % al Polinomial, el porcentaje más bajo se obtuvo con Kernel lineal con un valor del 98,8%. Con respecto a la sensibilidad el kernel polinomial logró un 91% obteniendo el mayor porcentaje seguido del kernel gaussiano y RBF con 90 % y el kernel lineal obtiene el porcentaje más bajo, para la especificidad se tiene un 99% para tres kernel (polinomial, gaussiano y RBF) y obteniendo de nuevo el kernel lineal el porcentaje más bajo; la exactitud del kernel Polinomial es de 94.6% con un total de 4.548 aciertos seguido del kernel gaussiano y RBF con 93% el porcentaje más bajo lo obtuvo el kernel lineal con 4.424 aciertos para un 92% de exactitud. En la Figura 11 se presenta la matriz de confusión para las imágenes sin segmentación para los diferentes tipos de Kernel analizados en este artículo.

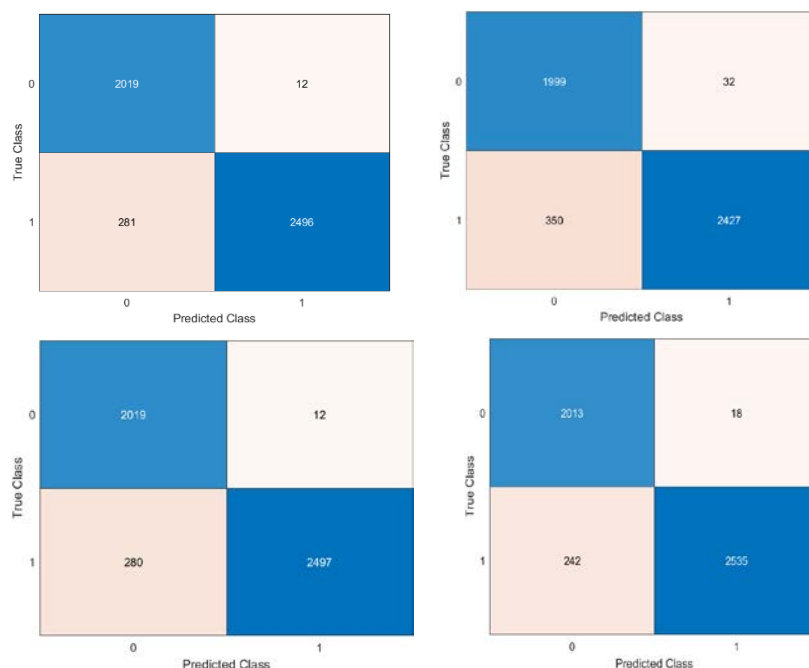


Figura 11. Matriz de confusión imágenes sin segmenta: a) Kernel Lineal, b) Kernel Gaussian, c) Kernel polynomial, y d) Kernel RBF

A continuación, en la Figura 12 se presenta la evaluación del clasificador usando ROC para imágenes sin segmentar, el Kernel polinomial tiene mejores resultados.

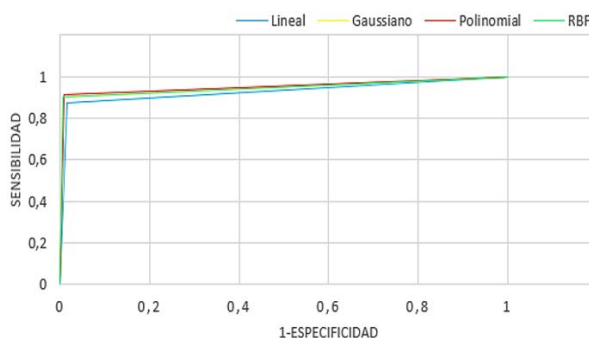


Figura 12. Curva de ROC imágenes sin segmentar

3.2 Imágenes segmentadas

En la Tabla 2 se muestra los datos de la evaluación de rendimiento del clasificador SVM con el conjunto de imágenes prueba segmentadas para diferentes funciones de kernel; la sensibilidad del clasificador entrega el 90% para el kernel Gaussiano y función base radial RBF; en tercer lugar, con 89.5% el kernel polinomial y con un 87% el kernel lineal. Para la especificidad, el kernel polinomial obtuvo el mejor resultado con un 94.7%, seguido del gaussiano y RBF con 93.8%, el lineal muestra un 89,1% siendo el valor más bajo. La mayor precisión se logra con el polinomial con 95,9% y el porcentaje más bajo con 91,6% para el lineal. El clasificador logra una exactitud del 91,7% para el polinomial, con 4409 aciertos, el gaussiano y RBF logran un 91,6% de exactitud y el lineal con la exactitud más baja con 4241 aciertos para un total de 88,2%

Tabla 2. Resultados de la evaluación del modelo con imágenes segmentadas

	TN	FP	FN	TP	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	Exactitud
LINEAL	1999	32	352	2425	87%	98%	98,7%	92,0%
GAUSSIANO	2019	12	281	2496	90%	99%	99,5%	93,9%
POLINOMIAL	2013	18	242	2535	91%	99%	99,3%	94,6%
RBF	2019	12	280	2497	90%	99%	99,5%	93,9%

En la Figura 13 se presenta la matriz de confusión para las imágenes segmentadas para los diferentes tipos de Kernel analizados en este capítulo.

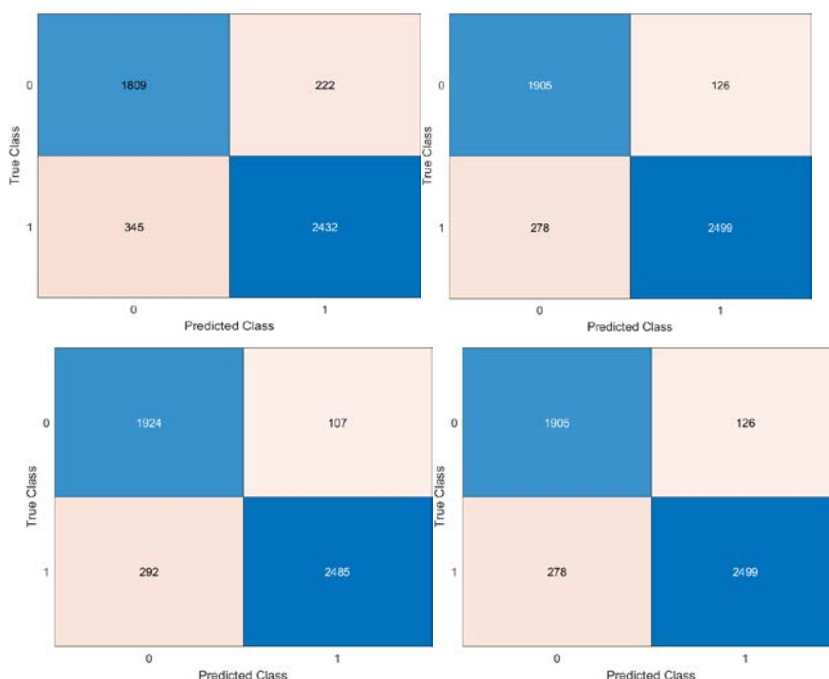


Figura 13. Matriz de confusión imágenes segmentadas: a) Kernel Lineal, b) Kernel Gaussiano, c) Kernel polinomial, y d) RBF

En la Figura 14 se presenta la curva de ROC para imágenes segmentadas, puede observarse que para este caso el Kernel polinomial y el RBF presentan el mejor rendimiento, seguidos del gaussiano; el Kernel lineal es el más deficiente.

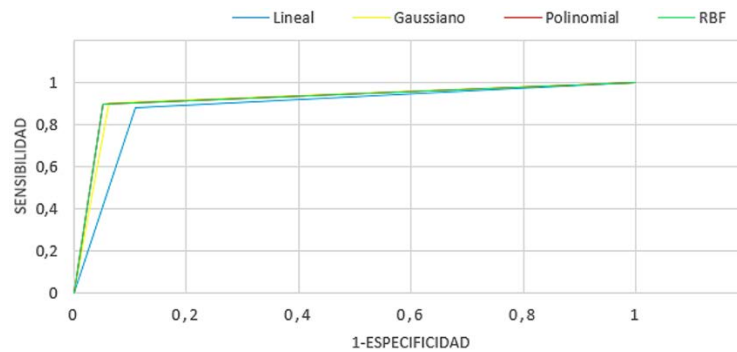


Figura 14. Curvas de ROC imágenes segmentadas

3.3 Gráfica de imágenes segmentadas y sin segmentar

En la Figura 15 se observa que al realizar la segmentación el clasificador tiene un menor desempeño. El Kernel polinomial es el que presenta el mayor rendimiento los parámetros de evaluación están por arriba del 90%. En general el clasificador basado en extracción de características de HOG y SVM presenta un buen rendimiento, sus parámetros de evaluación a excepción de la sensibilidad en imágenes segmentadas están por arriba del 90%.

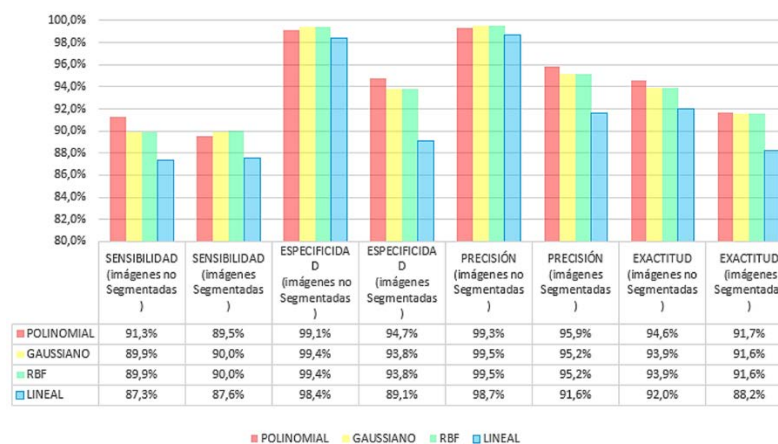


Figura 15. Resultados de los clasificadores para todos los tipos de kernel aplicando imágenes segmentadas y sin segmentar

3.4 Curva de ROC Kernel Polinomial

En la Figura 16 se observa la curva ROC para el Kernel Polinomial para imágenes segmentadas y sin segmentar, se encuentra que el rendimiento es mayor para las imágenes sin segmentar del dataset GTI para esas características.

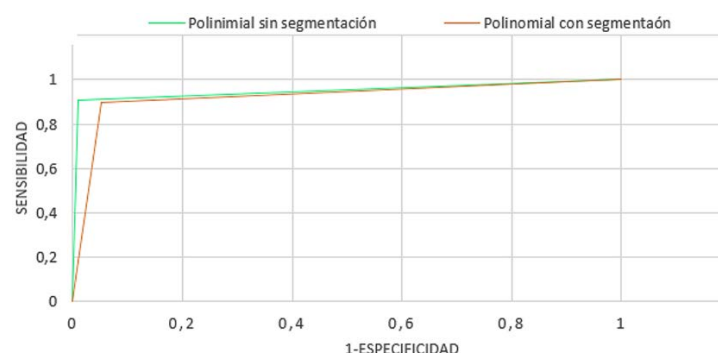


Figura 16. Curva de Roc Kernel polinomial imágenes segmentadas y sin segmentar

4. CONCLUSIONES

El kernel polinomial mostró el mejor rendimiento presentando una precisión de 99.3%, exactitud del 94.6% y especificidad del 99.1%, con imágenes no segmentadas.

Los resultados permiten concluir que para el conjunto de datos de GTI de tamaño 64x64, por sus características no requieren proceso de segmentación.

El clasificador entrenado con las imágenes sin segmentar presenta mejores resultados.

El uso de HOG permite controlar el número de características a extraer de la imagen cambiando la configuración del tamaño de celda, lo que facilita el entrenamiento del modelo.

La clasificación de imágenes de vehículos sin segmentar, y con diferentes condiciones de iluminación y saturación de color, mostró que el clasificador basado en SVM y características de HOG tiene un rendimiento en cuanto a precisión, exactitud, especificidad superiores a 90% esto debido a que extrae características de forma.

REFERENCIAS

- [1] M. Moscoso, T. Van Laake, L. Quiñones, C. Pardo, and D. Hidalgo, "Transporte urbano sostenible en América Latina". 2020.
- [2] Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional, simur. Recuperado: <https://www.simur.gov.co/indicadores/transporte-privado>
- [3] K. S. Jie and M. Liu, "Computer vision based real-time information acquisition for transport traffic," *ICIA 2005 - Proc. 2005 Int. Conf. Inf. Acquis.*, vol. 2005, pp. 164-169, 2005.
- [4] A. David, C. Alonso, and A. Mart, "Visión por computadora : identificación , clasificación y seguimiento de objetos."
- [5] R. A. Gonzalez, R. E. Ferro, and D. Liberona, "Government and governance in intelligent cities, smart transportation study case in Bogotá Colombia," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 25-34, 2020.
- [6] Reconocimiento de objetos, 2021. mathworks, Recuperado: <https://la.mathworks.com/solutions/image-video-processing/object-recognition.html>
- [7] N. A. Dobernack, "Implementación de un sistema de detección de señales de tráfico mediante visión artificial basado en FPGA," 2013.
- [8] R. Magro, "Binarización de imágenes digitales y su algoritmia como herramienta aplicada a la ilustración entomológica," *Boletín la SEA*, vol. 53, no. 53, pp. 443-464, 2013.
- [9] N. Dalal, B. Triggs, and D. Europe, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection," 2005. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2005, pp. 886-893 vol. 1.
- [10] P. S. Aulestia, J. S. Talahua, V. H. Andaluz, and M. E. Benalcázar, "Real-time face detection using artificial neural networks," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10614 LNCS, pp. 590-599.
- [11] E. Arroyave, "Deteccion Automatizada de Objetos en Secuencias de Video Utilizando HOG" (2015).
- [12] N. Tomikj and A. Kulakov, "Vehicle Detection with HOG and Linear SVM," *Medium*, vol. 1, no. June, pp. 6-9, 2021, Recuperado: <https://medium.com/@mithi/vehicles-tracking-with-hog-and-linear-svm-c9f27eaf521a>
- [13] H. F. Chen, "In silico log p prediction for a large data set with support vector machines, radial basis neural networks and multiple linear regression," *Chem. Biol. Drug Des.*, vol. 74, no. 2, pp. 142-147, 2009.
- [14] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, "Support Vector Machines," in *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000, pp. 93-124.
- [15] A. López, "Fundamentos Matemáticos de los Métodos Kernel para Aprendizaje Supervisado," p. 73, 2018.
- [16] G. Zhang, F. Gao, C. Liu, W. Liu, and H. Yuan, "A pedestrian detection method based on SVM classifier and optimized Histograms of Oriented Gradients feature," *Proc. - 2010 6th Int. Conf. Nat. Comput. ICNC 2010*, vol. 6, no. Icnc, pp. 3257-3260, 2010.
- [17] S. User, "vehicle_database", Gti.ssr.upm.es, 2021. Recuperado: https://s3.amazonaws.com/udacity-sdc/Vehicle_Tracking/vehicles.zip
- [18] D. Rodríguez, "Detección de Personas en Imágenes RGB-D", Maestría, Centro de Investigación en Matemáticas, 2013.
- [19] L. C. Asih, F. Sthevanie and K. N. Ramadhani, "Visual Based Fire Detection System Using Speeded Up Robust Feature and Support Vector Machine," 2018 *6th International Conference on Information and Communication Technology (ICICT)*, 2018, pp. 485-488.

- [20] Z. Hao, L. Kaidong y Q. Feng, "Improvement of Word Bag Model based on Image Classification", *IEEE 1st International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, 2019, págs. 272-276.
- [21] K.C. Kirana, S. Wibawanto y H. W. Herwanto, "Redundancy Reduction in Face Detection of Viola-Jones using the Hill Climbing Algorithm", *2020 4th International Conference on Vocational Education and Training (ICOVET)*, 2020, pp. 139-143.
- [22] R. Guo, X. Shen y X. Zhang, "3D ROC Histogram: A New ROC Analysis Tool Incorporating Information on Instances", en *IEEE Access*, vol. 7, pp. 183396-183404, 2019.
- [23] R. K.C. Billones, A. A. Bandala, E. Sybingco, L. A. Gan Lim, A. D. Fillone y E. P. Dadios, "Vehicle detection and tracking using corner feature points and artificial neural networks for a vision-based contactless apprehension system", *2017 Computing Conference*, 2017, pp. 688-691.
- [24] J. F. Sanabria S., John J.; Archila D., "Detección y análisis de movimiento usando visión artificial Motion Detection and Analysis Using Artificial Vision," 2011.
- [25] S. User, "vehicle_database", 2021. Recuperado: https://s3.amazonaws.com/udacity-sdc/Vehicle_Tracking/non-vehicles.zip
- [26] P. A. Mateus and C. L. Nino, "Adaptive algorithm to identify anomalies in moving objects using computer vision," *2016 IEEE Andescon*, 2016, pp. 1-4.

Diseño y aplicación de una herramienta para identificar y clasificar motocicletas mediante una red neuronal convolucional

Sandra Milena García Ávila¹

Cristian Alexander Vega Camacho²

José Vicente Cadena López³

Ricardo Alirio González Bustamante⁴

Paola Andrea Mateus Abaunza⁵

^{1,5} *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*

²⁻⁴ *Fundación Universidad Autónoma de Colombia*

Colombia

En los últimos años, el reconocimiento y detección de objetos en video ha sido una labor compleja para los sistemas de visión por computador. Con la evolución del aprendizaje profundo se han desarrollado algoritmos y modelos que permiten la detección y clasificación de objetos en tiempo real con un alto rendimiento. El objetivo de este capítulo es presentar un modelo capaz de detectar motocicletas en video basado en el entrenamiento de una Red Neuronal Convolutiva, y utilizando el entorno de trabajo You Only Look Once YOLOv3. El desarrollo de este sistema se dividió en tres fases: en la primera fase se recopiló más de 300 imágenes de motocicletas, en la segunda se extrajeron las características de cada imagen, y en la tercera se ejecutó el entrenamiento de la Red Neuronal Convolutiva CNN aprovechando la plataforma en la nube de Google Colab, que permitió utilizar la Unidad de Procesamiento Gráfico GPU de los servidores virtuales de Google. Los resultados obtenidos de la implementación del algoritmo alcanzaron una predicción del 99% para un video con una cámara en movimiento desde diferentes ángulos. De igual manera, se analizó el desempeño del sistema utilizando el video de una de las cámaras del Circuito Cerrado de Televisión CCTV ubicada en una de las avenidas principales de la ciudad de Bogotá, Colombia, cuyos resultados tuvieron una predicción del 89%.

¹ Contacto: sandra.garcia@unad.edu.co

² Contacto: cristian.vega@fuac.edu.co

³ Contacto: jose.cadena@fuac.edu.co

⁴ Contacto: gonzalez.ricardo@fuac.edu.co

⁵ Contacto: paola.mateus@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, alrededor del 55% de la población mundial - 4200 millones de habitantes - vive en ciudades. Se cree que esta tendencia continuará. En 2050, la población urbana se duplicará y casi 7 de cada 10 personas vivirán en ciudades [1]. Esta situación plantea nuevas necesidades y desafíos para el pilar de movilidad de las ciudades inteligentes [2].

La sobrepoblación y saturación de los sistemas de transporte público ha incentivado el uso de alternativas de movilidad, siendo la motocicleta uno de los principales medios de transporte a nivel mundial. En América Latina, Brasil lidera el mercado mundial con un 28%, siendo Colombia el segundo mercado más importante de la región y el 13^a en el mundo [3]. Este crecimiento ha generado un aumento importante en accidentes viales, según la Agencia Nacional de Seguridad Vial en Colombia. Se reporta que la mayoría de las víctimas son usuarios de motocicletas. Estos representan un 56,84% del total de los fallecidos en siniestros viales y también refleja un 61,81% del total de lesionados [4].

La ciudad de Bogotá es la urbe con el peor tráfico vehicular de América Latina y el mundo. Además de la velocidad de desplazamiento más lenta con 11 (mph). El bogotano pierde 133 horas en el año en desplazamiento vehicular [5]. Actualmente en Colombia no existen puntos de medición de tráfico en las grandes urbes. El reporte de tráfico vehicular se realiza en las casetas de peajes permanentes y las concesiones de primera generación dentro del territorio nacional. [6]. Estos controles están ubicados a las afueras de las ciudades, lugares donde el tránsito es fluido.

La visión por computador es uno de los sub-campos más importantes de la inteligencia artificial [7], la cual permite implementar distintos métodos para procesar, analizar y extraer información de las imágenes y de esta manera poder generar algoritmos de software que ayuden a interpretar los resultados obtenidos [8]. Dentro de las aplicaciones más destacadas de esta disciplina encontramos: El reconocimiento de objetos, la restauración de imágenes, construcción de modelos 3D, diseño de sistemas para vehículos autónomos, monitoreo o análisis de tráfico vial entre muchas otras.

El contexto de esta problemática puede ser atendido desde la disciplina de la visión por computador e inteligencia artificial, a través de variadas herramientas de procesamiento de imágenes y video para la extracción de información que brinden soluciones a las problemáticas de movilidad en las grandes urbes. En este trabajo se presenta la identificación y clasificación de motocicletas en video con cámaras fijas y móviles, mediante el uso de una red neuronal convolucional basada en el algoritmo YOLOv3.

2. MARCO CONCEPTUAL

En el campo de visión por computador se han desarrollado distintas técnicas para el procesamiento de imágenes y clasificación de objetos contenidos dentro de estas imágenes [9]. Una de las herramientas que durante los últimos años ha venido evolucionando en la implementación de algoritmos y sistemas de detección de objetos en tiempo real y que permite extraer ciertas características particulares en los datos de entrada, son las Redes Neuronales Convolucionales CNN.

La CNN es un tipo de Red Neuronal Artificial con aprendizaje profundo que procesa sus capas imitando el cortex visual del ojo humano, para identificar distintas características de los datos o imágenes de entrada a la red [10]. El propósito de la CNN es extraer todas las características de una imagen y posteriormente poder clasificar y detectar los objetos de interés de cada una de estas. Para lograr esto en el interior de la arquitectura de la Red Neuronal, se encuentran las capas convolucionales, que son operadores matemáticos dentro de la estructura de la CNN que permiten ejecutar uno de los procesos más representativos de esta clase de redes como lo son las convoluciones.

Estas consisten en tomar grupos de píxeles cercanos de la imagen de entrada e ir operando matemáticamente mediante un producto escalar contra una pequeña matriz llamada kernel [11], tal como se aprecia en la Figura 1.

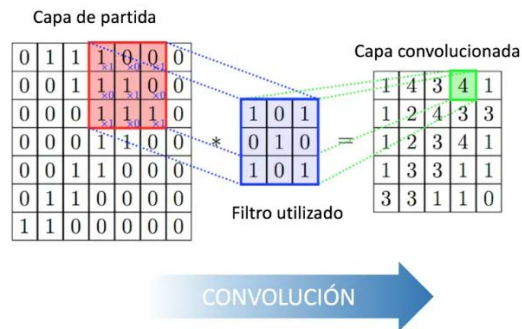


Figura 1. Proceso de convolución en la CNN [12]

Una Convolución es una operación matemática que transforma dos funciones en una tercera, la cual equivale a la superposición de una función sobre la otra [13]. La expresión que representa esta operación se establece teniendo una función f como entrada, en la cual g es el núcleo. La convolución entre estas dos funciones ($f * g$) se define como la integral del producto entre ambas funciones con un desplazamiento llamado t , en la ecuación (1) se muestra la formula correspondiente.

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(n)g(t - n)dn \quad (1)$$

Dentro de las Redes Neuronales Convolucionales se puede encontrar diferentes capas que componen su estructura y entre estas se tienen: las capas convolucionales explicadas previamente, las capas de reducción que cumplen con la función de reducir el tamaño de los mapas de características, que son el resultado de las capas convolucionales [14]. Estas aplican operaciones de submuestreo a cada mapa de características y dependiendo del diseño que se emplea se pueden implementar tres tipos de operadores. En la Figura 2 se observa la arquitectura.

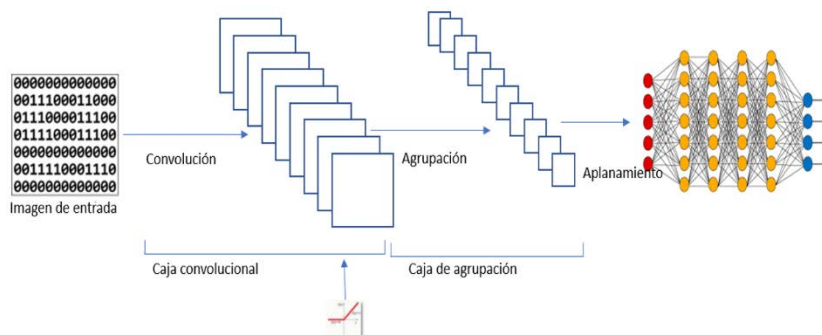


Figura 2. Arquitectura de capas para la CNN [15]

1. Máxima Agrupación: este devuelve el valor máximo entre todos los pixeles cubiertos por el kernel.
2. Mínima Agrupación: devuelve el valor mínimo entre todos los pixeles cubiertos por el kernel.
3. Promedio Agrupación: calcula el valor promedio entre todos los pixeles cubiertos por el kernel.

2.1 YOLOv3 algoritmo para la detección

El método de YOLOv3 consiste en la detección de objetos en tiempo real, dividiendo la imagen de entrada en una matriz de $N \times N$ celdas y en cada una de estas regiones el algoritmo predice la información de S posibles cuadros delimitadores como el cálculo de las puntuaciones de objetividad correspondientes a cada uno de estos cuadros delimitadores [16]. Si el centro de un objeto se ubica en una de las celdas de la región, esta celda se encarga de detectar ese objeto (Figura 3). La expresión que representa la puntuación del nivel de certidumbre obtenido en cada región se muestra en la ecuación (2) [17].

$$C_i^j = P_{i,j}(\text{Object}) * IOU_{verdadera}^{predicción} \quad (3)$$

De acuerdo con esto C equivale a la puntuación obtenida, j es el cuadro delimitador, i corresponde a la celda de la matriz, $P_{i,j}$ es una función del objeto. IOU_{pred}^{truth} Representa la predicción de la caja o cuadro predicho.

Cada celda detecta un número de cajas delimitadoras y cierto nivel de predicción para dichas cajas. Al final, esto refleja la probabilidad que dentro de esa caja se encuentra o contiene el objeto que debe detectar el modelo. Si no detecta el objeto el valor que tomaría C_i^j sería igual a 0 [18].

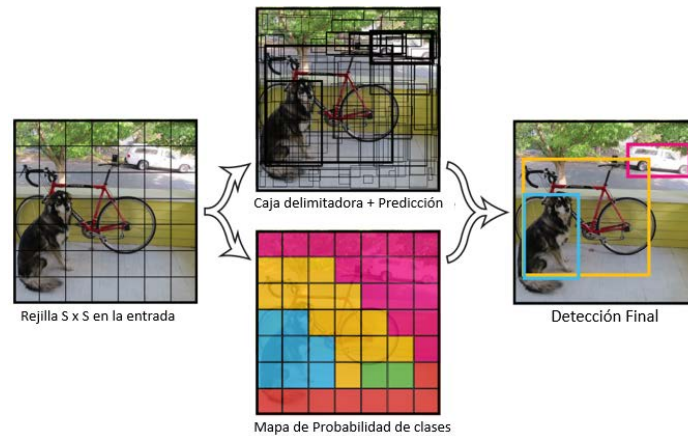


Figura 3. Método utilizado por YOLOv3, en la cual se divide la imagen en celdas pequeñas y sobre estas se generan cuadros delimitadores para poder realizar la detección de los objetos presentes en la imagen [19].

2.2 Arquitectura Neuronal YOLOv3

La arquitectura de la red para el modelo YOLOv3 está compuesta por 53 capas convolucionales. Cada una de estas la precede una capa de normalización de lote (Batch Normalization) y su respectiva función de activación (Leaky ReLU). Además de esto, para el proceso de la detección se concatenan 53 capas adicionales sumando un total de 106 capas totalmente convolucionales. Dentro del entorno de trabajo Darknet-53 [20] [21], YOLOv3 utiliza 3 mapas de características con diferentes escalas para la detección de objetos. En la figura 4 se puede observar la arquitectura de la red.

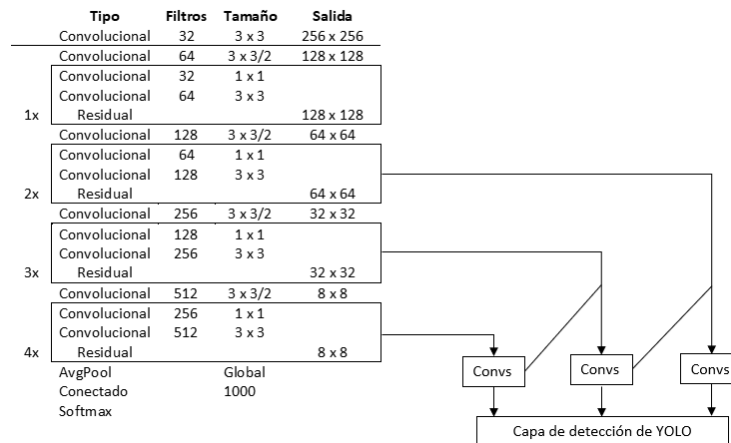


Figura 4. Arquitectura de Darknet-53 adoptada para YOLOv3 [22]

3. MÉTODO

En el desarrollo del algoritmo para la clasificación, detección y localización de motocicletas en tiempo real, se requiere como primera etapa instalar el entorno de trabajo Darknet-53 [23] directamente desde los repositorios en donde se encuentran almacenados los archivos de este modelo. Es importante destacar que Darknet-53 es un sistema multiplataforma que puede ser ejecutado desde sistemas operativos como Windows, Mac OS y Linux.

De igual manera, es posible diseñar y ejecutar este modelo desde equipos que tengan dentro de su arquitectura de hardware tarjetas gráficas dedicadas, hasta las máquinas que no la tengan, aunque el procesamiento del algoritmo trabajaría mucho más rápido en equipos que tengan una tarjeta gráfica ya que se podría aprovechar el uso de la Graphics Processing Unit GPU [24].

Las etapas de desarrollo para la clasificación e identificación del objeto de interés se dividen en tres (Figura 5): en la primera tenemos la recolección de la base de datos de imágenes para así poder realizar el etiquetado. En la segunda etapa se realizará el entrenamiento de la red neuronal convolucional utilizando el servicio Cloud de Google Colab y como tercera etapa se realizó la ejecución en tiempo real del algoritmo basado en YOLOv3 para la identificación de motocicletas en video [25].

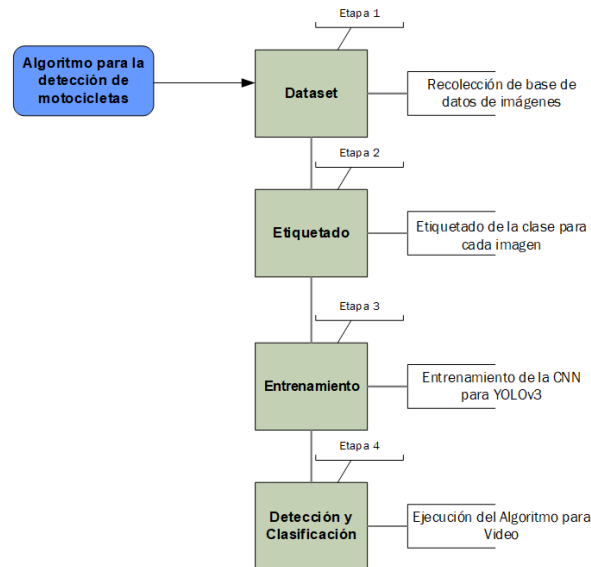


Figura 5. Diagrama de las etapas del proceso para el desarrollo del algoritmo para la detección de Motocicletas

3.1 Recopilación de datos

Se recopilamos varias imágenes de motocicletas de diferentes páginas de internet, para poder generar toda la base de datos necesaria, que posteriormente se utilizó en el entrenamiento de la red neuronal. Este conjunto de datos recopilado consta de imágenes en diferentes vistas y en múltiples resoluciones, con el objetivo de que la CNN pueda adaptarse fácilmente a las diferentes variaciones que se pueden encontrar en el tiempo real y así mejorar el desempeño de la red. Para el etiquetado y selección del área de interés (motocicleta) en cada imagen recolectada se utilizó el software *Labellmg* (Figura 6), que es una herramienta de anotación de imágenes gráficas y cuadros delimitadores de objetos de etiquetas en imágenes [26].

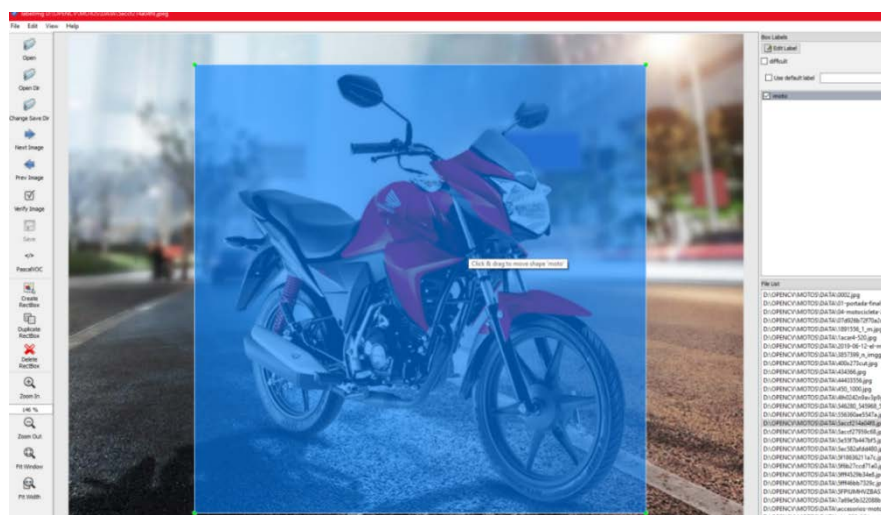


Figura 6. *Labellmg*. Software para el etiquetado y generación de cuadros delimitadores del objeto

Para generar esta base de datos se recolectaron 300 imágenes y cada una de estas se marcó con cajas delimitadoras del objeto de interés correspondiente. *Labellmg* genera un archivo de etiqueta con formato .txt con la información de las características de la imagen (coordenadas en los ejes X & Y, ancho y alto), esta información viene con la siguiente sintaxis: <object-class><x_center><y_center><width><height> [27], en la Tabla 1, se muestra las características de una imagen de motocicleta.

Tabla 1. Características de la imagen

Clase	Centro X	Centro Y	Ancho	Alto
15	0.526679	0.464828	0.804968	0.913103

3.2 Entrenamiento CNN con Google Colab

Para obtener un entrenamiento optimizado y más eficiente de la red neuronal convolucional se utilizan los servicios Cloud que brinda la plataforma de Google Colab. De esta manera se asegura tener acceso gratuito a la GPU que ofrecen los servidores en la nube de Google [28] y generar el código para el entrenamiento en un entorno de trabajo en Python.

En primera instancia se deben clonar los repositorios del entorno de trabajo de Darknet, que se encuentra alojado en Github y así habilitar en el archivo de configuración del modelo OpenCV y CUDA para Nvidia GPU [29], que permitirá acelerar el entrenamiento con la base de datos de imágenes de motocicletas y los archivos de etiqueta los cuales están correlacionados directamente. Dependiendo de la cantidad de información o archivos almacenados en la base de datos se calcula un tiempo aproximado de 8 horas, que fue el tiempo en que el modelo fue entrenado para la clasificación de una sola clase de objeto.

Como resultado del entrenamiento se generaron más de 3390 iteraciones con un promedio de pérdida del 0.038476 y una tasa de 0.00100, este promedio de pérdida se puede reducir si se permite que se ejecute el entrenamiento en el tiempo requerido. En la Tabla 2 se presentan los valores de los resultados obtenidos en este modelo.

Tabla 2. Resultados del entrenamiento realizado el Modelo Darknet53 con Google Colab

Iteraciones	3390
Promedio de pérdida	0.038476
Tasa de aprendizaje	0.00100
Tiempo de procesamiento del lote	4.736306
Coefficiente aleatorio	1.40

3.3 Ejecución del algoritmo Yolov3

Obteniendo el archivo que contiene la actualización de los pesos para la CNN, se procede a realizar las pruebas respectivas del rendimiento del entorno de ejecución para Yolov3. Previamente se requiere ajustar los parámetros de los archivos de configuración y en los que se encuentra el número y nombre de la clase motocicleta (coco.names, coco.data) [30] (Figura 7).

```
classes= 1
train = /home/pjreddie/data/coco/trainvalno5k.txt
valid = coco_testdev
#valid = data/coco_val_5k.list
names = data/coco.names
backup = /home/pjreddie/backup/
eval=coco
```

Figura 7. Archivo de configuración coco. Data para una clase

Igualmente se modifica el archivo donde se tiene parametrizado el número de capas de la CNN (Yolov3.cfg). En la versión 3 de YOLO se tienen 106 capas las cuales para producir resultados aplican núcleos de detección 1×1 en estas capas de la red (82, 94 y 106 capas), convoluciones de 1×1 aplicadas a imágenes de entrada con muestreo reducido [14]: (13×13), (26×26) y (52×52). En consecuencia, los mapas de características resultantes tendrán las mismas dimensiones espaciales (Tabla 3).

Tabla 3. Mapa de características en las diferentes resoluciones que utiliza Darknet-53. Elaboración Propia.

Tipo	Capas	Tamaño
Conv	82	$13 \times 13 \times 512$
Conv	94	$26 \times 26 \times 256$
Conv	106	$52 \times 52 \times 256$

Aplicando los parámetros necesarios en los archivos de configuración, para la correcta ejecución del algoritmo diseñado para la clasificación y detección de motocicletas, es necesario realizar las pruebas correspondientes, inicialmente para diferentes imágenes de entrada con diversas características como lo es la resolución de la imagen, nivel de saturación, iluminación entre otras variables que siempre van a estar presentes en un ambiente real.

3.3.1 Ejecución del algoritmo para la detección en imágenes

Utilizando diferentes imágenes de entrada a nuestro modelo ya previamente entrenado y diseñado, se ejecutan desde la línea de comandos en la terminal las instrucciones pertinentes para la detección y clasificación de estas imágenes de prueba (Figura 8). Este procedimiento se inicializa activando en primera instancia las librerías de OpenCV y OpenMP [25] desde el fichero de texto que utiliza make para llevar a cabo la compilación del algoritmo. Dependiendo de la arquitectura y las características técnicas de la tarjeta gráfica es indispensable también activar CUDA desde el makefile para YOLOv3, esto permitirá aumentar el rendimiento aprovechando la potencia de la unidad de procesamiento de gráficos (GPU) en el sistema [30].

```
crstian@CristianV MINGW64 /c/repos/darknet (master)
$ ./darknet.exe detect cfg/yolov3_testing.cfg cfg/yolov3_training_last.weights data/moto2.jpg
GPU isn't used
Used AVX
Used FMA & AVX2
OpenCV version: 4.5.2
```

Figura 8. Instrucciones para la detección en la imagen de prueba

En la línea de instrucciones ejecutada se tiene el archivo de configuración modificado para la detección de una sola clase de objeto, en este caso la motocicleta y en la cual se tiene establecido en sus líneas de código la estructura de todas las capas que utiliza la red neuronal convolucional en la versión 3 de YOLO (yolov3_testing.cfg) y de igual manera el archivo que contiene los pesos ya previamente entrenados para la CNN (yolov3_training_last.weights) [31]. Se adiciona la ruta en la cual se encuentran alojadas las imágenes que se utilizaran para la ejecución del modelo. De la Figura 9 a la 12 se muestra los resultados de la detección de la motocicleta junto con los porcentajes de predicción obtenidos en el algoritmo que se pueden observar en la Tabla 4.



Figura 9. Ejemplo de la clasificación de motocicletas en una imagen

```
Done! Loaded 107 layers from weights-file
94]
seen 64, trained: 236 K-images (3 Kilo-batches_64)
Detection layer: 82 - type = 28
Detection layer: 94 - type = 28
Detection layer: 106 - type = 28
data/moto2.jpg: Predicted in 1238.407000 milli-seconds.
moto: 100%
moto: 99%
moto: 100%
```

Figura 10. Valores del porcentaje de predicción en el objeto clasificado (100%, 99% y 100% en la predicción de los 3 objetos presentes en la imagen)



Figura 11. Ejemplo de la detección en imagen de entrada vista frontal se observa los recuadros que delimitan el objeto clasificado y su porcentaje de predicción

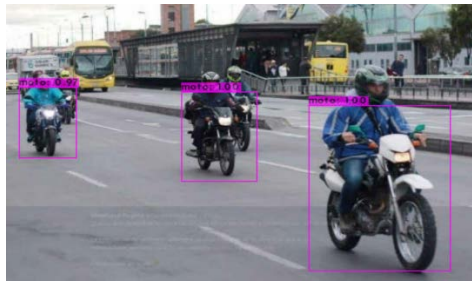


Figura 12. Ejemplo de la detección en avenida 30 de la ciudad de Bogotá. Se puede observar que, de los objetos presentes en la imagen, el algoritmo detectó 3 motocicletas con unos porcentajes de predicción del 97%, 100% y 100% respectivamente de izquierda a derecha

Tabla 4. Resultados de la detección para la Figura 12

Tasa de procesamiento	Tiempo (ms)	Predicciones (%)
65.304	1250.106000 milisegundos	97
		100
		100

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez realizada las pruebas de detección en diferentes imágenes de entrada, se procede a ejecutar el algoritmo para la detección de motocicletas en video. Esto se realiza en primera instancia para un video que utiliza una cámara móvil desde diferentes ángulos, en una de las avenidas principales de la ciudad de Bogotá. En este apartado se mostrará el análisis de los resultados obtenidos de acuerdo con las métricas obtenidas en la matriz de confusión [32], una herramienta que permite visualizar el desempeño del algoritmo representado en los valores obtenidos, en la que cada fila indica las predicciones de la clase real, mientras que las columnas son las predicciones que genera el modelo desarrollado [33]. De acuerdo con esta matriz se puede calcular la exactitud, precisión, sensibilidad y la especificidad del algoritmo (Tabla 5).

Tabla 5. Matriz de confusión en donde se determina la eficiencia del sistema [34]

		Predicho por la red	
		Objeto presente	Objeto no presente
Situación Real	Objeto presente	VP	FN
	Objeto no presente	FP	VN

En la Tabla 5 se puede observar los parámetros necesarios para crear la matriz de confusión. Dentro de estos tenemos los siguientes: VP (verdadero positivo), FN (falso negativo), FP (falso positivo) y VN (verdadero negativo) [35]. Respectivamente se tiene que VP corresponde a las detecciones correctas de motocicletas en el video, FN es el número de objetos que no detectó la red, FP son los objetos que no pertenecen a la clase y VN es la situación que ocurre cuando no se encuentra presente el objeto y el algoritmo no lo detecta [32]. De acuerdo con lo anterior se realiza el análisis para el primer video que tiene una duración de 24 segundos. En la Tabla 6 se representan los valores obtenidos junto con las métricas.

Tabla 6. Matriz de Confusión en la detección de motocicletas con cámara móvil

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	18	1
	Negativos	3	14

Para determinar la eficiencia del algoritmo se deben calcular los valores de Exactitud, Precisión, Sensibilidad y Especificidad utilizando las ecuaciones (3) a (6) planteadas en la Tabla 7 [36]. Estas ecuaciones se aplican para cada una de las matrices de confusión elaboradas de acuerdo con el análisis que se le realiza al video.

A continuación, se muestran los resultados de la detección de motocicletas para el caso anteriormente explicado. En la Figura 13 se tienen segmentos del video en donde se puede observar el funcionamiento del algoritmo.

Tabla 7. Análisis estadístico del algoritmo YOLOv3

Exactitud	$\frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$	(3)
Precisión	$\frac{VP}{VP + FP}$	(4)
Sensibilidad	$\frac{VP}{VP + FN}$	(5)
Especificidad	$\frac{VN}{VN + FP}$	(6)

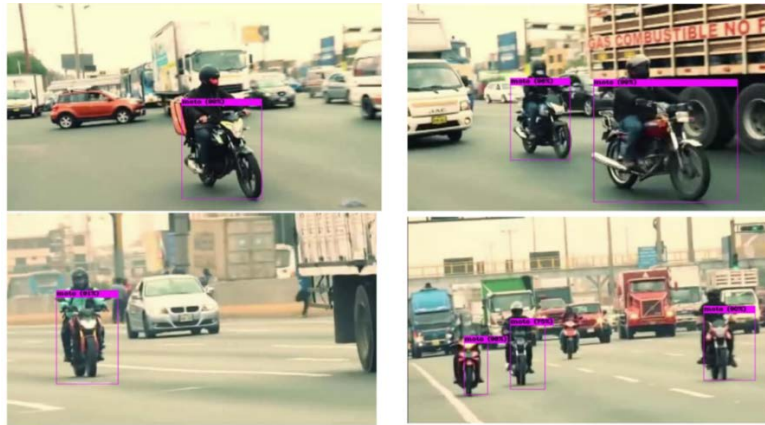


Figura 13. Representación de la detección de motocicletas para el video anteriormente analizado con cámara móvil

4.1 Análisis del rendimiento del algoritmo en video con cámara fija CCTV

Utilizando los videos de vigilancia de las cámaras CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) de seguridades instaladas en las avenidas principales de la ciudad de Bogotá, se realiza el análisis de desempeño del algoritmo. En la Tabla 8 se presentan los valores de la matriz de confusión para este caso.

Tabla 8. Matriz de Confusión en la detección de motocicletas en video CCTV. Elaboración Propia.

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	10	2
	Negativos	7	27

De igual manera que en el caso anterior se presentan los resultados del funcionamiento del algoritmo utilizando una cámara CCTV instalada en una de las avenidas de la ciudad de Bogota (Figura 14).

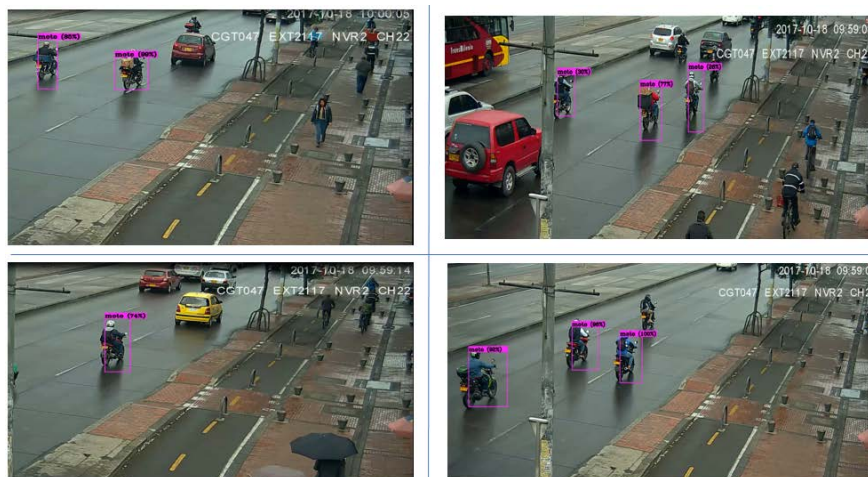


Figura 14. Resultados de la detección de motocicletas utilizando las cámaras CCTV de la ciudad de Bogotá

Como resultado del desempeño del algoritmo para la detección de motocicletas en el video con cámara móvil, se obtuvo una precisión en las predicciones del 94.73% con una exactitud del 88.8% y una sensibilidad del 85.71% que dentro del margen de resultados esperados se evidencia que la proporción de detecciones

positivas en el video es bastante alta [37]. En el caso del análisis del video con cámara fija se obtuvo una exactitud del 80.43%, una precisión del 83.33% y una sensibilidad del 58.82%. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del análisis estadístico

	Cámara Fija (%)	Cámara Móvil (%)
Exactitud	80.43	88.88
Precisión	83.33	94.73
Sensibilidad	58.82	85.71
Especificidad	72.97	43.75

5. CONCLUSIONES

Este capítulo ha presentado una descripción del algoritmo para la detección y clasificación de motocicletas basado en YOLOv3 y el marco de referencia Darknet-53, el cual utilizó dentro de su arquitectura una Red Neuronal Convolutiva como método de aprendizaje profundo en el modelo de detección. Debido a los avances que se han desarrollado durante los últimos años en el campo de visión por computador e inteligencia artificial ha permitido el desarrollo de algoritmos para el reconocimiento de objetos en tiempo real con un alto rendimiento y desempeño.

Los resultados obtenidos en este sistema se basaron en la ejecución del modelo en dos ambientes de prueba con condiciones diferentes. Para el primer caso se utilizó el video de una cámara en movimiento desde varios ángulos grabada en una de las calles de la ciudad de Bogotá y se obtuvo un 94.73% de precisión en las detecciones de motocicletas, con una exactitud del 88.88%. En el segundo caso se empleó el video de una de las cámaras CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) fija, que se encuentran ubicadas en diferentes lugares y avenidas principales de la ciudad. Para este caso los resultados obtenidos fueron de un 83.33% de precisión en el reconocimiento de motocicletas y un 80.43% de exactitud.

Al comparar los resultados logrados en estos dos ambientes de prueba se encuentra que el desempeño del algoritmo utilizando una cámara móvil fue más preciso que el caso de la cámara fija CCTV. Esto se debe a que la distancia en la que se encuentra la cámara de seguridad está más alejada de los objetos presentes en el video.

El resultado de este trabajo será implementado como apoyo al proyecto de investigación interinstitucional *Modelo de Identificación y Seguimiento de Automóviles y Motociclistas para la Medición de Variables de Tráfico a través de Inteligencia Artificial, en Ciudades Inteligentes*.

REFERENCIAS

- [1] «Banco Mundial,» Abril 2020. Recuperado: <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#1>
- [2] R. E. F. D. L. Gonzalez, «Government and governance in intelligent cities, smart transportation study case in Bogotá Colombia,» *Science Direct*, vol. 11, n° 1, p. 34, 2020.
- [3] Publimotos, «El mercado de las motos afronta una fuerte caída a nivel mundial,» Recuperado: <https://www.publimotos.com/mactualidad/3114-el-mercado-de-las-motos-afronta-una-fuerte-caida-a-nivel-mundial>
- [4] Agencia Nacional de Seguridad Vial, «Histórico víctimas,» Agencia Nacional de Seguridad Vial, 2021.
- [5] B. Pishue, «2020 Global Traffic Scorecard,» INRIX, 2020.
- [6] «Departamento de Planeación Nacional,» 06 05 2021. Recuperado: <https://www.dnp.gov.co/estudios-y-publicaciones/estudios-economicos/indicadores-de-coyuntura-economica/Paginas/indicadores-traffic-vehicular.aspx>
- [7] X. Z. a. S. Xu, «Research on Image Processing Technology of Computer Vision Algorithm,» *2020 International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL)*, pp. 122-124, 2020.
- [8] P. A. M. a. C. L. Nino, «Adaptive algorithm to identify anomalies in moving objects using computer vision,» *IEEE Andescon*, pp. 1-4, 2016.
- [9] C. D. J. Á. F. Manlio Massiris, «Detección de equipos de protección personal mediante red neuronal convolucional Yolo,» *Revistaespacios.com*, pp. 1-8, 2018.

- [10] Cifuentes, A., Mendoza, E., Lizcano, M., Santrich, A. y Moreno, S. 2020. Recuperado: <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identific/article/download/4007/4359>
- [11] «Aprende machine learning,» 29 11 2018. Recuperado: <https://www.aprendemachinlearning.com/como-funcionan-las-convolutional-neural-networks-vision-por-ordenador/>
- [12] D. Calvo, «diegocalvo.es,» 20 07 2017. Recuperado: <https://www.diegocalvo.es/red-neuronal-convolucional/>
- [13] E. R. S. Guzman, «<https://biorobotics.fi-p.unam.mx/>,» Universidad Nacional Autónoma de México, 03 2020. Recuperado: https://biorobotics.fi-p.unam.mx/wp-content/uploads/Courses/reconocimiento_de_patrones/tutoriales/YOLO-Introducci%C3%B3n-e-implementaci%C3%B3n-.pdf
- [14] D. -H. L. K. -M. L. a. C. -H. L. J. -H. Won, «An Improved YOLOv3-based Neural Network for De-identification Technology,» *34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, Vols. 1, pp. 1-2, 2019.
- [15] Alvaro, R. 2020. Recuperado: <https://machinelearningparatodos.com/vision-por-computador-y-redes-neuronales-articulo-de-colaboracion/>
- [16] J.-C. Z. S.-D. S. C.-F. Y. a. J. L. Yi-Qi Huang, «Optimized YOLOv3 Algorithm and Its Application in Traffic Flow Detections,» *Applied sciences*, 28 04 2020.
- [17] S. L. Liquan, Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, 24 03 2020. Recuperado: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/3/537/pdf>
- [18] R. R. G. Rodríguez, Universidad Complutense de Madrid/Universidad de Granada (SICUE), 2019. Recuperado: <https://revistas.ulatina.ac.cr/index.php/tecnologiavital/article/download/250/260/547>
- [19] A. Rosebrok, Recuperado: <https://www.pyimagesearch.com/2018/11/12/yolo-object-detection-with-opencv/>
- [20] S. R. S. Osses, 2020. Recuperado: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176546/Detecci%C3%B3n-de-prendas-de-vestir-utilizando-modelos-de-detecci%C3%B3n-de-objetos-basados-en-deep-learning.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 24 06 2021].
- [21] W. H. H. P. Chen, «Chen, W., Huang, H., Peng,» p. 805-813, 12 03 2020.
- [22] Z. A. Ali, «hindawi,» 12 05 2021. Recuperado: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/9975700/fig5/>
- [23] R. P. y. M. C. Kumar B., «YOLOv3 y YOLOv4: Detección de objetos múltiples para aplicaciones de vigilancia,» *Tercera Conferencia Internacional sobre Sistemas Inteligentes y Tecnología Inventiva*, pp. 1316-1321, 2020.
- [24] Y. C. y. S. Chien, «Unidad de textura configurable para redes neuronales convolucionales en unidades de procesamiento de gráficos,» *Conferencia internacional IEEE de 2019 sobre circuitos y sistemas de inteligencia artificial (AICAS)*, pp. 234-238, 2019.
- [25] R. M. R. S. A. S. y. P. G. A. Shekade, «Clasificación de vehículos en el sistema de vigilancia del tráfico utilizando el modelo YOLOv3,» *Conferencia internacional de 2020 sobre electrónica y sistemas de comunicación sostenibles (ICESC)*, pp. 1015 -1019, 2020.
- [26] P. S. Foundation, «pypi.org,» 21 Julio 2017. Recuperado: <https://pypi.org/project/labelimg/1.4.0/>
- [27] M. Guillermo, «"Detection and Classification of Public Security Threats in the Philippines Using Neural Networks,» *IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, pp. 320-324, 2020.
- [28] Google, «google colaboratory,» Recuperado: <https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=es>
- [29] Y. L. B. W. y. Q. Z. Z. Jiang, «Sistema de detección y rango de objetivos UAV basado en visión monocular implementado en OpenCV y Tensor Flow,» *Simposio Internacional de Computación Distribuida y Aplicaciones para Ingeniería y Ciencia Empresarial de 2019 (DCABES)*, pp. 88-91, 2019.
- [30] B. W. a. Y. G. B. Xu, «Vehicle Detection in Aerial Images Using Modified YOLO,» *IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pp. 1669-1672, 2019.
- [31] L. D. F. T. a. W. Y. X. Yang, «SAR Image Despeckling Using Pre-trained Convolutional Neural Network Models,» *Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, pp. 1-4, 2019.
- [32] M. V. A.-F. F. J. A.-L. a. J. R.-A. J. L. Garcia-Balboa, «Homogeneity Test for Confusion Matrices: A Method and an Example,» *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1203-1205, 2018.
- [33] J. i. B. Arce, 26 07 2019. Recuperado: <https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/>
- [34] M. Massiris, «Repositorio Institucional de la UDC,» Universidad Nacional del Sur y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, 5 09 2018. Recuperado: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24891/2018_Massiris_Manlio_Detecci%C3%B3n-equipos-protecci%C3%B3n-personal-red-neuronal-convolucional-YOLO.pdf
- [35] C. H. Menacho Chiok, «Predicción del rendimiento académico aplicando técnicas de minería de datos,» Lima-Peru, 2017.
- [36] P. W. K. M. S. K. H. W. a. A. R. M. Ohsaki, «Confusion-Matrix-Based Kernel Logistic Regression for Imbalanced Data Classification,» *EEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 29, n° 9, pp. 1806-1819, 2017.
- [37] T. R.-G. L. C. M. T. Jesús Valencia, «Detección de infracciones y matrículas en motocicletas, mediante visión artificial, aplicado a Sistemas Inteligentes de Transporte,» *Revista Iberica de sistemas y Tecnologías de Información*, pp. 1-15, 2020.

Análisis a las potencialidades de uso de los recursos tecnológicos en procesos de enseñanza-aprendizaje

Gabriela Bohórquez Ramírez¹
Alexandra María Silva Monsalve²
Universidad Santo Tomás
Colombia

El presente trabajo se orientó en el análisis de recursos tecnológicos para el uso efectivo y eficiente de plataformas digitales en procesos de enseñanza-aprendizaje. Para este estudio se tuvieron en cuenta especialmente las plataformas en un análisis de sus características tecnológicas, en correspondencia con su aporte en la mediación educativa. Se adelantó un diseño metodológico en dos fases: en la primera se realizó una revisión de la literatura y los portales que albergan dichas plataformas, y en la segunda se aplicó un instrumento para la revisión de los criterios relacionados con un manejo eficiente de los recursos internet y las herramientas que poseen las plataformas. Finalmente, los resultados permitieron identificar en orden de relevancia frente a las características en estudio para cada plataforma.

¹ Estudiante de Ingeniería en Informática, vinculada al semillero TEAGIC.

Contacto: gabrielabohorquez@ustadistancia.edu.co

² Profesora e investigadora.

Contacto: alexandrasilva@ustadistancia.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La transformación de los procesos productivos y los aspectos sociales, económicos y políticos se han configurado a través del tiempo. Inicialmente la economía se fundamentó en los procesos agrícolas, pasando a los industrializados. Seguidamente la incursión de la tecnología propició el surgimiento de la Industria 4.0, generando cambios significativos en la Sociedad Contemporánea. Es así como surge la denominada Sociedad de la Información, esta emerge como consecuencia de los cambios de una producción, agrícola e industrial que aportaba en la economía, posicionándose el sector de servicios como un nuevo sector económico [1]. Al respecto Castells menciona que en la era de la información, los sectores de la economía se han convertido generando novedades en sectores de servicios, comunicaciones, comercio, transporte, educación, entre otros. De igual manera, Peter Drucker afirma que el conocimiento se ha convertido en una nueva fuente de transformación de la riqueza y que llegaría a producir hasta el 50% de la riqueza.

No obstante, aunque la tecnología ha permeado las diferentes áreas y sectores económicos, existe una carencia significativa en algunos países, especialmente en América Latina. Lo referido anteriormente, es denominado la brecha digital, la cual se define como la distancia que separa al grupo que puede acceder a las TIC del grupo que no [2]. Autores como Kuttan y Peters dividen la brecha digital atendiendo a las características tecnológicas y las características sociales, tal como se expresa en la Figura 1.

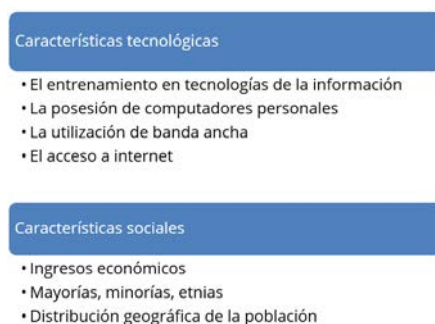


Figura 1. Características de la brecha digital [3]

Otro enfoque caracteriza la brecha digital en diferentes momentos: brecha temprana, brecha digital primaria o brecha de uso y la brecha digital secundaria o brecha de calidad de uso, que identifica las diferencias entre la participación de los que tienen acceso y los usuarios [4]. En los estudios relacionados con la brecha digital, en su mayoría se identifican la adquisición de infraestructura, por lo que es importante orientarse en otros factores que permitan reducir otras condiciones que impiden el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación TIC, entre estos las habilidades de uso hacia las TIC, el acceso motivacional y la confianza en el uso de las TIC [3].

Derivado de las medidas de confinamiento obligatorio para detener la expansión del virus, drásticamente las empresas y las instituciones educativas tuvieron que adaptar modelos digitales para el teletrabajo o la formación. En América Latina, esto hizo aún más evidente la desigualdad social existente. Particularmente en Colombia la brecha es evidente, mientras que el 21% de los hogares de estratos uno tiene acceso a internet, el 99,8% de los hogares estrato seis están conectados [5]. Según datos del Ministerio de las Tecnologías de la Información y Comunicación MINTIC, en los reportes de 2015 y 2016 se presentan datos de la conectividad a Internet en los hogares expresados así: 1) Banda Ancha Vive Digital un total de 15,306,066 y demás conexiones correspondientes a 546.925; y 2) Internet móvil, un total de suscriptores de 9.916.552 y la demanda se expresaba en 13, 831, 615; comparando la conectividad tanto en banda ancha como en Internet móvil respecto a la población en Colombia, la cual cerró para 2015 con 48.203.000 personas y en el 2016 con 48.748.000 [6].

Las anteriores cifras dejan ver que el porcentaje de cobertura de Internet no es consecuente con el crecimiento de la población. Seguidamente según informes del censo en el país, cuatro de cada cinco viviendas con conexión a Internet están concentradas en tan solo 38 de los 1123 municipios de Colombia [7]. Datos más recientes del censo presentados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DANE muestran, primero que, en cubrimiento de acceso a internet, Colombia frente a otros países de América Latina se encuentre en el puesto 10; también se expresa que solo el 53% de las viviendas en el país tienen acceso a internet [8].

Las anteriores cifras presentadas por informes de diferentes organizaciones del estado dejan al descubierto una realidad en el país manifestada en desigualdad digital, este hecho afecta considerablemente a la población de los estratos menos favorecidos, en cuanto al limitado acceso a los recursos tecnológicos o de conectividad a internet. Por lo anterior surge la necesidad de proponer estrategias que permitan hacer uso de recursos tecnológicos de acceso abierto y que hagan uso efectivo y eficiente de los recursos de internet.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Uso de herramientas tecnológicas y plataformas digitales

Actualmente, hablar de herramientas tecnológicas se ha hecho inevitable, convirtiéndose así en un elemento primordial de la cotidianidad humana produciendo hoy en día novedosas formas de generación de conocimiento y acceso a la información y se pueden clasificar según la necesidad que tenga el usuario. [9], de forma que su efecto está produciendo cambios en los diferentes aspectos de la sociedad del siglo XXI como en el entorno empresarial, educativo e incluso del hogar.

Así, los recursos tecnológicos están proyectados como un mecanismo de *software* o *hardware* para la simplificación de trabajo, además de permitir la búsqueda, manejo e intercambio de información y conocimiento eficientemente. En este sentido, las herramientas tecnológicas han permitido vencer distintas barreras y al mismo tiempo, ahorrar tiempo al momento de desarrollar cualquier tarea, conjuntamente su utilización ha sido un punto fundamental para la consecución de resultados óptimos y la disminución de costos en los diferentes sectores sociales y económicos [10].

De la misma forma, por ejemplo, el uso de soluciones tecnológicas en el entorno educativo pone de manifiesto todo un entorno por explorar, en especial los nuevos ambientes de enseñanza- aprendizaje. De hecho, las plataformas educativas e-learning permiten que los estudiantes y profesores se mantengan constantemente actualizados de información, mejorando a su vez sus competencias lectoras y su capacidad crítica para el manejo de información y conocimiento. Así, a lo largo del proceso de enseñanza al ingresar al entorno virtual de aprendizaje aquí se realiza el primer contacto con las tecnologías de la información y las comunicaciones. Sin embargo, es importante que los usuarios hagan uso de las mismas con el propósito de que la experiencia virtual sea efectiva y se apropien de las diversas herramientas tecnológicas que tienen a su disposición [11].

En resumen, es posible definir la sociedad actual como dinámica, sujeta al acceso al conocimiento y de las herramientas tecnológicas usadas con el propósito de empoderar a los seres humanos a ser más eficientes y efectivos en el desarrollo de sus labores. No obstante, es indispensable realizar un análisis previo orientado a qué necesidades y en qué contexto se desea mejorar procesos y a través de que herramienta tecnológica se pretende alcanzar determinado propósito sin que la tecnología se transforme en un nuevo inconveniente en lugar de una solución.

A su vez, la importancia de las herramientas tecnológicas queda fuera de cualquier oposición, en estos últimos años se han vuelto sumamente indispensable, el progreso tecnológico en prácticamente cada uno de los aspectos de la vida hace frente al reto de la reinención y de dejar progresivamente a un lado los métodos clásicos de trabajo, ya que este tipo de herramientas buscan facilitar la incorporación del componente tecnológico permitiendo formar personas que puedan dar respuesta a los requerimientos de la sociedad moderna exitosamente.

2.2 Internet y usos funcionales

Por otro lado, el internet es considerado como un recurso tecnológico de uso masivo más importante de los últimos tiempos definida como un inmenso entorno de comunicación digital, el contexto social actual se

ha transformado en una civilización permeada de tecnología estrechamente vinculada de los servicios y funcionalidades que tengan que ver con la internet. Básicamente, se define como el sistema a nivel mundial que posibilita el acceso a una gran fuente de información práctica y dinámica disponible en cualquier servidor, así como también en un medio global de comunicación [12]. De este modo, su influencia no solo comprende los ámbitos técnicos de la informática, sino también de la sociedad en general, debido a que el acelerado progreso tecnológico ha permitido el progreso hacia un uso mayor de las herramientas tecnológicas como por ejemplo, el comercio electrónico, la obtención de información, las operaciones comunitarias y los procesos educativos [13].

De esta manera, al ingresar a este entorno virtual opuesto al real pero que tiene gran impacto sobre él, es posible crear interconexiones con diversos usuarios alrededor del mundo, obtener información orientada a gran variedad de temáticas, investigar y aprender, escuchar música, ver videos y películas y demás usos de la web en la vida cotidiana. Esto, permite definir internet como un medio de comunicación, interacción y organización social [14]. Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, es posible definir algunos usos principales que tiene el internet para las personas (Figura 2).



Figura 2. Usos y funcionales de internet

2.2.1 Soporte activo de aprendizaje

En la actualidad, para los procesos de formativos, Internet brinda una gran variedad de mecanismos que benefician el aprendizaje autónomo y la personalización de la enseñanza de los estudiantes. De esta manera, ha sido evidente que el Internet ha tenido gran impresión en todos los niveles educativos, facilitando un aprendizaje sin ningún tipo de barrera. Así, en Internet los miembros de las comunidades académicas tienen la posibilidad de compartir conocimientos, promover nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje que cautiven la atención e incentiven la creatividad de los estudiantes en cualquier momento y lugar, desde cualquier dispositivo. En adición a esto, al conectar estudiantes y profesores existe la gran posibilidad de crecimiento económico y social alrededor del mundo, buscando construir una sociedad de aprendizaje global [15].

2.2.2 Fuente de información y conocimiento

Internet posee una gran base de datos con información multimedia de todo tipo y sobre cualquier temática. Por lo cual, las personas encuentran en esta herramienta la oportunidad de encontrar una gran variedad de información relacionada con la actividad que lo impulsa a buscarla, de manera más eficaz y sencilla [16]. Al mismo tiempo, Internet posee un conjunto de ventajas tales como el dinamismo de la información rápida y de fácil uso además de su universalidad. Sin embargo, también posee una cierta cantidad de inconvenientes, a causa de la facilidad que tiene cualquier usuario para publicar y compartir información en la red lo que hace que su calidad sea discutible.

2.2.3 Entorno de entretenimiento

Durante los últimos años, el entretenimiento ha adquirido un rol protagónico en el uso de internet, además del agrado que brinda el descubrimiento de información sobre tópicos que sean de interés específicos, no cabe duda en que el internet se ha convertido en el mejor aliado del entretenimiento posibilitando el acceso a una gran variedad de programas y entornos de entretenimiento lúdicos. De hecho, Internet brinda la posibilidad a los usuarios de realizar diversas actividades, no solamente funciona como medio de comunicación. A través de plataformas como YouTube, Netflix o Spotify los usuarios pueden visualizar videos, películas o escuchar música de manera personalizada desde cualquier dispositivo.

2.2.4 Medio de comunicación social y expresión

Internet conforma un medio de comunicación a nivel mundial cómodo y versátil, favoreciendo la comunicación y las relaciones interpersonales, permitiendo compartir y debatir pensamiento, facilitando el trabajo colaborativo y la divulgación de las creaciones y proyectos personales. De esta manera, Internet también ha cambiado la manera de relacionarnos en el plano afectivo. En este sentido, actualmente todas las personas están comunicadas de una forma más accesible, inmediata y sencilla, acercando las relaciones interpersonales a la pantalla de los dispositivos tecnológicos [15].

Finalmente, es importante destacar que Internet es un entorno en el cual se evidencian los diversos contextos de la vida humana: educación, entretenimiento, política, economía y demás. Aquí, como en el contexto real, la anonimidad no está presente, cualquier cosa que se escribe o comparte a través de Internet, se almacena y puede ser rastreado. Es por ello, que como en la vida real, los usuarios se encuentran expuestos a diversos peligros por los cuales debe tener un comportamiento responsable hacia los que se consulta y comparte. De este modo, valores como el respeto, tolerancia y honestidad son fundamentales cuando se hace uso de la red [17].

3. MÉTODO

Se realizó una revisión sistemática de la literatura, incluyendo como fuentes los sitios *web* que proveen plataformas tecnológicas para la incorporación en contextos educativos, para la cual se tuvieron en cuenta las siguientes categorías: definición, características tecnológicas, tipos de *software*, recursos mínimos de usuario y de desarrollo. En la segunda fase, una vez identificadas las plataformas, se procedió a aplicar el instrumento de EduTools, el cual permitió evaluar los criterios en las plataformas, estos criterios se orientaron en comunicación, productividad, administración, entrega de cursos, desarrollo de contenidos y *hardware* y *software*.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El proceso de selección de diferentes modelos de plataformas *e-learning* para apoyar los procesos de aprendizaje en las instituciones educativas, tiene en cuenta los enfoques pedagógicos en los cuales se han desenvuelto los diversos *Learn Learning Management System* (LMS), factor de gran relevancia a la hora de la elección. Sin embargo, por el gran uso de estos entornos muchas de estas llegan a poseer funciones similares, así como también la integración de estándares de usabilidad, accesibilidad, interactividad y demás características tecnológicas que dificultan la selección de la plataforma conforme a los lineamientos de las instituciones educativas y en especial las condiciones de los usuarios (administrativos, profesores como desarrolladores de contenido educativo y principalmente a los estudiantes como usuarios de esta). Por tal motivo, el propósito de esta primera fase es establecer un instrumento de evaluación que favorezca la toma de decisiones para que una Institución educativa pueda adquirir e implementar un tipo de plataforma de aprendizaje.

4.1 Características y criterios de selección de la plataforma de aprendizaje LMS [18]

El instrumento de *EduTools* se constituye en una herramienta indispensable en la toma de decisiones de tecnología educativa, reconocida por su análisis comparativo a través de una matriz minuciosa de características y criterios para la evaluación y selección de plataformas de aprendizaje lo que permitió acelerar los múltiples procesos internos de las diferentes instituciones educativas o distribuidores de servicios educativos para la revisión y evaluación de entornos *e-learning*. Esta matriz, abarca mecanismos de comunicación, instrumentos de participación para los estudiantes, herramientas para impartir asignaturas, medios para el desarrollo de contenidos y características de *hardware/ software*.

Por tal motivo, fue fundamental establecer características y criterios que posibilitaran realizar un análisis desde aspectos pedagógicos, técnicos y administrativos en las diversas plataformas de gestión de aprendizaje. De este modo, es importante identificar que los LMS se encuentran asociados a dos clases: código abierto y privadas, siendo un principio fundamental al momento de la toma de decisiones. Así,

considerando las condiciones de las instituciones educativas seleccionadas, los objetivos educativos, los requerimientos tecnológicos, entre otros factores a tener en cuenta dentro del proceso de desarrollo e implementación, se realizó una revisión detallada de plataformas de aprendizaje de código abierto detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de recursos tecnológicos comparativa de plataformas LMS para instituciones educativas

Plataforma	Definición	Características tecnológicas	Tipo de software	Recursos mínimos de usuario	Recursos mínimos de desarrollo
MOODLE	Moodle (Entorno de Aprendizaje Dinámico Orientado a Objetos Modular) es un sistema de enseñanza proyectado para la creación y gestión de espacios de aprendizaje en línea adecuado a las necesidades de los maestros, estudiantes y administradores desarrollada por el pedagogo e informático Martin Dougiamas basando su diseño en la teoría de aprendizaje constructivista: el centro del aprendizaje son las actividades.	Idónea para el aprendizaje en línea y para integrar el aprendizaje presencial. Posee una interfaz de navegación sencilla, ligera y eficiente. Proporciona diversos tipos de actividades para las asignaturas, como tareas, chats, foros, cuestionarios, entre otras. Brinda la posibilidad de añadir diversos contenidos multimedia. Accesibilidad y compatibilidad desde cualquier navegador web.	Software de código abierto: Moodle puede personalizarse y adecuarse a las necesidades individuales a través de su estructura de funcionamiento modular. Es una plataforma de aprendizaje que permite prestar el servicio desde un grupo pequeño de estudiantes hasta una gran cantidad de ellos, tanto en instituciones pequeñas como en grandes.	Ingreso desde cualquier dispositivo: El ingreso a Moodle se hace desde el navegador web, por lo que puede accederse a él desde cualquier lugar, en cualquier momento y desde cualquier dispositivo. Su interfaz es compatible con los diferentes dispositivos móviles y todos los navegadores de internet. Cuando se abre una actividad que permite visualizar contenido sin conexión en la aplicación, esa actividad siempre se sincronizará cuando el dispositivo esté conectado a una red de internet.	Espacio de disco: 200 MB para el código de Moodle, más cuanto se necesite para almacenar los materiales. Procesador: 1GHz (mínimo), se recomienda 2GHZ doble núcleo o más. Memoria: 512 (mínimo), 1GB o más es fuertemente recomendado. Más de 8GB es típico para un gran servidor de producción.
ATUTOR	ATutor es una herramienta de gestión del aprendizaje basado en la web que se usa para desarrollar cursos de aprendizaje en línea. Los administradores pueden instalar y personalizar ATutor en un mínimo de tiempo, además de ampliar funcionalidades a través de funcionamiento modular. Debido a las características de la plataforma, puede proyectarse hacia el desarrollo de proyectos e-learning dentro de Universidades e Instituciones educativas.	Los profesores pueden ensamblar, empaquetar y redistribuir rápidamente contenido instructivo e interactivo basado en la Web para cada una de sus asignaturas en línea. Los estudiantes aprenden en un entorno de aprendizaje social accesible, adaptativo. ATutor fue diseñado con la accesibilidad como prioridad. Una amplia gama de funciones garantiza que los usuarios puedan participar plenamente en cada una de las actividades dentro del entorno de aprendizaje.	Software de código abierto: ATutor es un programa diseñado en PHP, Apache, MySQL. Trabaja sobre plataformas Windows, GNU/Linux, Unix, Solaris. Al ser un software de tipo código abierto, lo convierte en una herramienta beneficiosa para instituciones pequeñas y grandes que desarrollan contenido educativo y ofrecen asignaturas académicas mediadas por la internet.	Ingreso desde cualquier dispositivo a través del navegador: Permite el ingreso a estudiantes, profesores y administradores, sin dejar de lado a través de acceso a la web. ATutor hace uso de muchas funciones HTML actuales que solo son compatibles con los navegadores web actuales. Los paquetes de contenido de aprendizaje se pueden exportar desde ATutor para verlos sin conexión.	Servidor web HTTP (Apache) PHP 5.0.2+. MySQL - 4.1.10 a 5.6. * (MySQL 5.7 agregado en ATutor 2.2.4.) Se requiere una cuenta de usuario de base de datos con el privilegio de crear bases de datos. Ese mismo usuario también necesitará crear privilegios de tabla.

ILIAS	<p>ILIAS es una plataforma LMS Opensource bajo la licencia GLP enfocada en el sector académico y corporativo del e-learning. Un aspecto distintivo y característico de esta plataforma es su capacidad de poder utilizar los contenidos como si fueran piezas de lego, permitiendo así armar generar cursos mediante un "reciclado de materiales", la ofreciendo una versatilidad que hace interesante su utilización. Además posee un mayor nivel de seguridad en comparación con otras plataformas educativas.</p>	<p>Gestión de cursos flexible que permite una amplia gama de diferentes escenarios didácticos. Los programas de estudio permiten el mapeo de cursos completos de estudio y formación utilizando una sola herramienta. Compartir contenido fácilmente con la carga de archivos ultrarrápida mediante arrastrar y soltar. Es escalable, funciona de la misma manera con un número pequeño que grande de usuarios. Usa tecnología adecuada: su lenguaje de programación posibilita el desarrollo de webs dinámicas.</p>	<p>Software de código abierto: ILIAS es una plataforma de código abierto. Nunca se tendrá que pagar una tarifa de licencia para usar ILIAS. Si se hace necesario de algún requisito especial, los proveedores de servicios oficiales de ILIAS proporcionan orientación y colaboración en el servicio de implementación. Es importante destacar que El desarrollo de ILIAS está coordinado por la Sociedad ILIAS en Colonia, Alemania. Como organización sin fines de lucro, ILIAS Society depende de las cuotas de membresía y las donaciones para operar.</p>	<p>Ingreso desde cualquier dispositivo a través del navegador: Permite su uso desde dispositivos móviles o incluso desde un computador a través de un navegador web. Al mismo tiempo, posibilita su uso como un reproductor de contenidos educativos de una asignatura, como una plataforma de colaboración completa, o como cualquier combinación que se adecue a las necesidades de las instituciones educativas.</p>	<p>Hardware: 512 Mb de RAM 80 Gb de disco duro Pentium IV 2,4 GHZ</p> <p>Software: Apache 1.3.28 – servidor web MySQL 4.0.14 – base de datos PHP 4.3.2 Zlib 1.1.4 - librería de compresión ImageMagick 4.2.9 herramienta gráfica GD 1.8.4 – Librería grafica para usar con PHP Info- ZIP 2.3 – Utilidad de compresión</p>
-------	--	--	--	---	---

La mayoría de los entornos *e-learning* poseen distintas opciones que permiten la gestión del aprendizaje que caracterizan a cada uno de los *LMS*, dichas herramientas se encuentran más o menos evolucionadas en cada una de las plataformas, continuamente realizando perfeccionamiento a las mismas con el propósito de favorecer la relación entre los miembros de la comunidad educativa y el ambiente de aprendizaje en línea adquirido. Por tal razón, a través de instrumento propuesto por EduTools [18] se indagó y recopilaron los criterios más importantes que permitieron realizar la evaluación y selección del LMS más apropiado para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta las necesidades tecnológicas de los miembros de las instituciones educativas descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios y características de evaluación para LMS [18]

Herramientas de comunicación		
Foro de debate	El foro de discusión es una conversación de texto en línea entre los participantes.	Los estudiantes pueden habilitar o deshabilitar las publicaciones que se enviarán a su correo electrónico. Los estudiantes pueden recibir publicaciones por correo electrónico como resúmenes diarios de líneas de asunto o publicaciones enteras.
Intercambio de archivos	Los instrumentos de intercambio de documentos posibilitan el cargue de archivos desde equipos locales y compartirlos con instructores u otros estudiantes en un curso. Los archivos adjuntos a los mensajes forman parte de los foros de discusión.	Los estudiantes pueden enviar tareas mediante cuadros desplegables. Los estudiantes pueden distribuir el contenido de sus unidades personales con sus compañeros de clase. Los administradores pueden fijar las limitaciones de capacidad en disco para cada usuario.
Correo electrónico interno	El correo electrónico interno es correo electrónico que se puede leer o enviar desde dentro de un curso dentro del LMS.	Los estudiantes disponen de e-mail integrado para enviar un correo electrónico a individuos o grupos. Los profesores pueden remitir correos electrónicos a toda la clase al mismo tiempo en una sola dirección.

Chat en tiempo real	El chat en tiempo real es una conversación sincrónica entre usuarios a través de Internet que implica el intercambio de mensajes de un lado a otro prácticamente al mismo tiempo.	La herramienta de chat admite discusiones de grupo simultáneas ilimitadas. La herramienta de chat posee un diseño estructurado para que los estudiantes realicen preguntas y profesores para proporcionar respuestas.
Herramientas de productividad		
Calendario/Revisión de progreso	Las herramientas de revisión de calendario/progreso permiten al estudiante organizar sus planes para un curso y las asignaciones asociadas en un curso.	Los instructores pueden publicar anuncios en una página de anuncio del curso. Los estudiantes poseen una página de inicio personal que enumera todos los cursos en los que el estudiante está inscrito y todos los eventos del curso. Los estudiantes pueden ver sus calificaciones sobre las tareas completadas, el total de puntos posibles y la calificación total de la asignatura.
Trabajar sin conexión /Sincronizar	Trabajar sin conexión/sincronizar es un conjunto integrado de mecanismos que permiten a los estudiantes trabajar sin conexión en su curso en línea y que su trabajo se sincronice en el curso la próxima vez que inicien sesión. A veces, los estudiantes pueden descargar el contenido del curso en sus equipos locales y trabajar sin conexión.	Los estudiantes pueden compilar y descargar el contenido de todo un curso en un formato que se puede imprimir o almacenar localmente.
Herramientas de administración		
Autenticación	La autenticación es un procedimiento que funciona como un bloqueo y una clave al proporcionar acceso al software por parte de un usuario que introduce el nombre de usuario (inicio de sesión) y la contraseña adecuados. La autenticación también hace referencia al procedimiento mediante el cual se crean y mantienen los nombres de usuario y las contraseñas.	Los administradores pueden permitir el acceso de los invitados a todos los cursos. La plataforma es compatible con el servicio de autenticación del mismo. Los administradores pueden configurar la autenticación de conmutación por error en un origen secundario (por ejemplo, la propia base de datos) en caso de que se produzca un error en el origen principal.
Autorización del curso	Las herramientas de autorización del curso se utilizan para asignar privilegios de acceso específicos al contenido del curso y herramientas basadas en roles de usuario específicos, por ejemplo, estudiantes, instructores, asistentes de enseñanza. Por ejemplo, los estudiantes pueden ver páginas y los instructores pueden crear páginas.	Los administradores pueden crear un número ilimitado de unidades organizativas y roles personalizados con privilegios de acceso específicos para el contenido y las herramientas del curso. A los instructores o estudiantes se les pueden asignar diferentes roles en diferentes cursos.
Herramientas de entrega de cursos		
Tipos de prueba	Los tipos de prueba indican qué tipos de preguntas admite el software.	Opción múltiple Respuesta múltiple Cotejo Ordenamiento Sentencia confusa Calculado Rellenar el área en blanco Respuestas cortas Preguntas en formato encuesta Las preguntas pueden incluir elementos multimedia (imágenes, vídeos, audio) Se pueden definir tipos de preguntas personalizados.
Gestión automatizada de pruebas	La gestión automatizada de pruebas incluye el manejo de cuándo y dónde se pueden realizar las pruebas y bajo qué condiciones.	El sistema puede aleatorizar las preguntas y respuestas. Los profesores pueden crear autoevaluaciones. Los profesores pueden establecer un límite de tiempo en una prueba. Los profesores pueden permitir varios intentos. A los estudiantes se les permite revisar los intentos pasados de un cuestionario. Los profesores pueden especificar si los resultados correctos se exponen como comentarios.
Soporte de pruebas automatizadas	El apoyo automatizado de pruebas incluye servicios del sistema para importar y exportar pruebas y bancos de pruebas, así como análisis estadísticos de los resultados de las pruebas.	Los profesores pueden crear bancos de pruebas personalizados.

Libro de calificaciones en línea	El libro de calificaciones en línea incluye soportes para realizar un seguimiento del progreso de los estudiantes y trabajar en línea en apoyo de la asignación de calificaciones del curso.	<p>Cuando un profesor agrega una asignación al curso, la plataforma la agrega automáticamente al libro de calificaciones.</p> <p>Los profesores pueden exportar las puntuaciones del libro de calificaciones a una hoja de cálculo externa.</p> <p>Los profesores pueden crear una escala de calificación de curso que puede emplear porcentajes, calificaciones de letras o métricas de paso/error.</p>
Gestión de cursos	Las herramientas de gestión de cursos permiten a los instructores controlar el progreso de una clase en línea a través de los componentes académicos integrados al curso.	<p>Los profesores pueden liberar selectivamente asignaciones, evaluaciones y anuncios basados en fechas de inicio y finalización específicas.</p> <p>Los profesores pueden liberar materiales en función de un único criterio (fecha, calificación, etc.)</p> <p>Los profesores pueden configurar material específico del curso que se publica en una fecha determinada y debe ser completado por los estudiantes antes de continuar con el curso.</p> <p>Los profesores pueden personalizar el acceso a contenidos específicos del curso en función de la pertenencia a grupos.</p>
Seguimiento de estudiantes	El seguimiento de estudiantes es la capacidad de realizar un seguimiento del uso de los materiales del curso por parte de los estudiantes, y de realizar análisis e informes adicionales tanto de uso agregado como individual.	<p>Los profesores pueden realizar un seguimiento de la regularidad y la duración del ingreso de los estudiantes a los componentes individuales del curso.</p> <p>Los profesores pueden obtener informes que muestren la hora y la fecha y la frecuencia de los estudiantes como un grupo agregado al que se accede al contenido del curso.</p>
Herramientas de desarrollo de contenido		
Uso compartido/reutilización de contenido	El proveedor del producto auto informa que el software cumple con las directrices WAI WCAG 1.0 AAA.	<p>El repositorio puede ser de todo el sistema o para unidades organizativas individuales.</p> <p>Las herramientas están aptas para habilitar el seguimiento de versiones y la integración a versiones específicas, así como la generación y administración de flujos de trabajo para el desarrollo y revisión de contenido colaborativo.</p> <p>Para cualquier material del repositorio, los usuarios pueden visualizar informes que evidencian todos los cursos del sistema que utilizan actualmente el elemento seleccionado.</p>
Plantillas de curso	Las plantillas de curso son elementos que ayudan a los profesores a desarrollar la estructura inicial de un curso en línea.	<p>El software proporciona soporte para la creación de cursos basados en plantillas.</p> <p>El sistema proporciona documentación de diseño de cursos que proporcionan guías paso a paso que llevan a los profesores y diseñadores de cursos a través de la finalización de tareas comunes del curso, como la configuración de la página de inicio del curso, módulos de contenido, discusión.</p> <p>El sistema posibilita hacer uso de un curso existente o una plantilla predefinido como cimiento para un nuevo curso.</p>
Aspecto y sensación personalizados	Look and Feel personalizado es la capacidad de cambiar los gráficos y cómo se ve un curso. Esto también incluye la capacidad de marcar institucionalmente los cursos.	<p>El sistema proporciona plantillas predeterminadas de apariencia y aspecto del curso.</p> <p>Las instituciones pueden crear su propio aspecto y sentir plantillas en todo el sistema, incluyendo sus propios logotipos institucionales, encabezados y pies de página.</p>
Herramientas de diseño instructivo	Las herramientas de diseño instructivo ayudan a los instructores a crear secuencias de aprendizaje, por ejemplo, con plantillas de lección o asistentes.	<p>Los profesores pueden organizar objetos de aprendizaje, herramientas de curso y contenido en secuencias de aprendizaje reutilizables.</p> <p>Los profesores pueden crear secuencias de aprendizaje lineales organizadas por curso, lección y tema.</p>
Hardware/Software		
Navegador de cliente	Explorador de cliente requerido es el tipo y número de versión del navegador web (por ejemplo, Internet Explorer 3.0, Netscape 4.0) que funciona eficazmente con el sistema de administración del curso.	
Requisitos de la base de datos	Los requisitos de base de datos son especificaciones técnicas para el software de administración de bases de datos (por ejemplo, Oracle o SQL) requeridos por el sistema de administración del curso.	<p>El aula virtual es compatible con Oracle.</p> <p>El aula virtual admite MS SQL Server.</p> <p>El aula virtual es compatible con MySQL.</p> <p>El aula virtual es compatible con PostgreSQL.</p> <p>La plataforma virtual solo requiere una base de datos y puede coexistir con tablas de otras aplicaciones.</p>
Servidor Windows	Windows Server significa que el sistema de administración de cursos se ejecuta en un servidor que usa alguna versión del sistema operativo Microsoft Windows.	Una versión de Windows está disponible.

De acuerdo con lo anterior, fue posible entender que plataformas de aprendizaje se caracterizan por ser un entorno con soluciones apropiadas para la comunidad educativa. Por lo cual, la investigación se desarrolló incluyendo la plataforma *Moodle* reconocida por su gran uso a nivel institucional y de este modo la gran comunidad académica que posee, su ventaja sobre las demás se define por su gratuidad, esto quiere decir que su proceso de instalación es de libre acceso, además de que posibilita que los usuarios de todo el mundo trabajen y programen para su desarrollo, su principal beneficio es que posee gran variedad de funciones personalizables, por lo que pueden integrarse fácilmente acordes al proyecto que se esté desarrollando.

En segundo lugar, ILIAS, desarrollada con objetivos educativos y pedagógicos claramente definidos, es una plataforma de acceso abierto. Así, la membresía voluntaria en la asociación ILIAS es rentable y permite influir directamente en el proceso de desarrollo. Al mismo tiempo, permite la personalización de su aspecto, implementar escenarios de aprendizaje y vinculación con un sitio *web*, basándose en la idea de biblioteca, permitiendo la provisión de una amplia variedad de materiales de aprendizaje y trabajo en todas las áreas del sistema. Finalmente, Atutor, esta plataforma que no es usada con frecuencia por las instituciones educativas cuenta con una pequeña comunidad de usuarios y programadores a su alrededor, al mismo tiempo se encuentra integrada por una interfaz de navegador sencilla, eficiente y compatible. De este modo, su base de tecnológica es de código abierto, lo que la convierte en una herramienta rentable para instituciones pequeñas y grandes que desarrollan contenido de aprendizaje e imparten asignaturas online.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio que se orientó en el análisis de recursos tecnológicos para el uso efectivo y eficiente de plataformas digitales en procesos de enseñanza y aprendizaje, permitiendo evidenciar que existen un número considerable de plataformas, que cuentan con herramientas disponibles para su uso.

Sin embargo, al identificasen tanto recursos disponibles en internet, es necesario identificar las características en sus dimensiones tecnológicas y también en aspectos que permitan una configuración eficiente para la incorporación en contextos educativos.

En consecuencia, del aislamiento preventivo que se originó producto de la pandemia del Covid-19, diferentes instituciones se vieron obligadas a implementar plataformas digitales para impartir sus clases.

En este momento, se hizo necesario la caracterización de plataformas que especialmente fueran de código abierto y de fácil implementación; este fue uno de los principales objetivos que orientaron el presente análisis y que finalmente permitió identificar aquellas plataformas que pueden utilizarse abiertamente y que poseen una comunidad de aprendizaje suficiente como para orientar en su implementación.

REFERENCIAS

- [1] Forero, «La Sociedad del Conocimiento,» *Revista Científica General José María Córdoba*, vol. 5, pp. 40-44, 2009.
- [2] Ramírez y A. Gutiérrez, «Brecha Digital en Colombia,» 2008. CINTEL.
- [3] H. Peña, K. Cuartas y G. Tarazona, «La brecha digital en Colombia: un análisis de las políticas gubernamentales para su disminución,» *Redes e Ingeniería*, p. 13, 2017.
- [4] Mancinelli, Elisa, «e-Inclusion in the Information Society Comisión Europea,» 2007. Recuperado: http://www.itkk.hu/netis/doc/ISCB_eng/10_Mancinelli_final.pdf
- [5] FORBES, «Economía y Finanzas,» 2020. Recuperado: <https://url2.cl/xDNxG>
- [6] Macro, D, «Demografía,» 2019. Recuperado: Obtenido de <https://url2.cl/wCplh>
- [7] Departamento Nacional de Planeación, «Plan Nacional de Desarrollo,» 2018. Recuperado: www.dnp.gov.co/DNP/Paginas/Metas-del-Plan-Nacional-de-Desarrollo-2018-2022.aspx.
- [8] Departamento Administrativo de Estadística DANE, «Demografía,» 2019. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/index.php/60-espanol/demograficas/censos>.
- [9] J. Sierra Llorente, I. Bueno Giraldo y S. Monroy Toro, «Análisis del uso de las tecnologías TIC por parte de los profesores de las Instituciones educativas de la ciudad de Riohacha,» *Revista Omnia*, vol. 22, n° 2, 2016.
- [10] J. P. Acevedo-Rincón y C. E. Flórez-Pabón, «TelEduc: A virtual learning environment for teaching and learning at the University of Campinas, Brazil. In Journal of Physics,» *IOP Publishing*, vol. 1161, n° 1, p. 012023, 2019.

- [11] N. E. Suarez Suarez y J. Custodio Najar, «Evolución de las tecnologías de información y comunicación en el proceso de enseñanza-aprendizaje,» *Revista vínculos*, vol. 11, nº 1, 2014.
- [12] B. Consuelo, «Los recursos tecnológicos (TIC),» *Unidad de Tecnología Educativa. Universidad de Valencia*, 2013.
- [13] L. Barry M., C. Vinton G., D. D. Clarck, R. E. Kahn, D. C. Lynch, J. Postel, L. G. Roberts y W. Stephen, «Internet Society. Breve historia de internet,» Internet Society, 1997. Recuperado: <https://www.internetsociety.org/es/internet/history-internet/brief-history-internet/>
- [14] M. Castells, «Internet y la sociedad RED,» de *Conferencia de Presentación del Programa de Doctorado sobre la Sociedad de la Información y el Conocimiento*, España, 2000.
- [15] Z. Detzel, «El impacto de internet en la vida diaria,» BBVA OpenMind, 2013. Recuperado: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/el-impacto-de-internet-en-la-vida-diaria/>
- [16] M. Munitich Mladín, «Internet, fuente general de información: Uso y soporte como referencia bibliográfica de trabajos prácticos,» *Reflexión Académica en Diseño y Comunicación on line*, vol. 21, nº 1, p. 200, 2013.
- [17] MinTIC, «Internet, ¿qué es? ¿para qué sirve?,» En TIC Confío, 12 Septiembre 2015. Recuperado: <https://www.enticconfio.gov.co/internet-que-es-para-que-sirve>
- [18] «EduTools,» The Western Cooperative for Educational Telecommunications, 2006. Recuperado: <http://www.edutools.info/>

Algoritmo de clasificación de daños en carreteras utilizando aprendizaje profundo

Diego Alejandro Rodríguez Salamanca¹
Universidad Militar Nueva Granada
Colombia

El desgaste del pavimento incrementa de forma significativa el nivel de inseguridad en una vía, llegando a ser una de las principales causas de accidentes de tránsito. Un indicador de este desgaste o deterioro son las grietas en el pavimento y en casos extremos se generan baches. Muchas de las soluciones que hacen uso de visión por computador o redes neuronales, propuestas anteriormente, se enfocan en la detección de daños específicos, más precisamente en grietas y algunos daños no tan significativos, ya que dichos modelos fueron entrenados con conjuntos de datos relativamente pequeños y con poca variedad de imágenes y, a la hora de enfrentarse a daños más complejos, no realizan una correcta detección. En Bogotá, Colombia, las vías presentan cerca de 30 años de daño acumulado, por lo que los modelos previos no funcionan de forma correcta. Para solucionarlo, en este trabajo se hizo uso de la transferencia de aprendizaje, específicamente del modelo *efficientnetB7*, y para determinar el desempeño del modelo se hace uso de la métrica de precisión.

¹ Contacto: est.diego.rodriguez4@unimilitar.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desgaste del pavimento incrementa de forma significativa el nivel de inseguridad en una vía llegando a ser una de las principales causas de accidentes de tránsito [1], un indicador de este desgaste o deterioro son las grietas en el pavimento y en casos extremos las cavidades que se generan en el pavimento debido al avanzado desgaste de este, dichas cavidades se conocen más comúnmente como baches [2]. Con el tiempo se han llegado a proponer diversos métodos de detección usando procesamiento de imágenes apoyado en los desarrollos del aprendizaje automático ya que realizar este tipo de detección de forma manual requiere de una enorme cantidad de esfuerzo, tiempo y dinero debido al numeroso personal que esta labor requiere y a la subjetividad de este [3-12].

Muchas de las soluciones propuestas anteriormente se enfocan en la detección de daños específicos más precisamente grietas, o algunos daños no tan significativos ya que los modelos presentados fueron entrenados con conjuntos de datos relativamente pequeños y con poca variedad de imágenes y a la hora de enfrentarse a daños más complejos no realizan una correcta detección, además de ello algunos requieren de una gran cantidad de imágenes en de difícil adquisición como lo son las imágenes térmicas [8, 9] lo cual incrementa los costos a la hora de la implementación de dicho modelo.

Según el informe presentado por la Alcaldía de Bogotá en el año 2018, para un proyecto de recuperación y mantenimiento de la malla vial, cerca del 53% de las vías de la ciudad presentan algún tipo de deterioro dejando estas vías en estado malo o regular, muchos de estos daños superan los 30 años de deterioro acumulado [13]. Dado este amplio periodo de tiempo el deterioro ha generado diversos tipos de daños en las vías lo cual aumenta significativamente la peligrosidad de estos.

En esta investigación se busca realizar un modelo de aprendizaje profundo que se aplique a un deterioro tan significativo, el cual realice una correcta detección y clasificación de los daños que presentan las vías de Bogotá, todo esto a un bajo costo, con el fin de realizar una correcta clasificación y detección se hizo uso del conjunto de datos propuesto por Ochoa [11], este conjunto de datos presenta una mayor complejidad y variedad de imágenes permitiendo así el desarrollo de un modelo que se adapte más fácilmente al deterioro presentado en las vías bogotanas.

2. MÉTODO

Una estrategia para la implementación de aprendizaje profundo es la transferencia de aprendizaje en la cual haciendo uso de algunos modelos con buen rendimiento al ser sometidos con anterioridad al conjunto de datos imagenet [14]. El conjunto de datos consta de 6141 imágenes separadas en 3 categorías como se observa en la Figura 1, dicha separación es casi homogénea por lo cual se divide esta conjunto de datos en 3 porcentajes, primero 60% para entrenar el modelo, 20% para validación interna del modelo, 20% para validación externa o test, estos datos de test permiten ver con certeza cómo responderá el sistema con imágenes diferentes a las del entrenamiento, las imágenes de validación interna permiten ver si el modelo extrajo las características necesarias para clasificar de forma correcta los 3 tipos de daño.



Figura 1. Ejemplos de imágenes en el conjunto de datos: a-b) grieta de cocodrilo, c-d) grieta lineal, e-f) bache

Con el fin de simplificar la tarea de clasificación se realizó la modificación de alrededor de 500 imágenes disminuyendo así la complejidad de estas y aumentando el porcentaje de aciertos presentados por el modelo. Para este problema se realizó la transferencia de aprendizaje desde el modelo EfficientNetB7 [15] este modelo contiene un elevado número de capas las cuales realizan la extracción de múltiples características que permiten la correcta clasificación de las diversas imágenes, como se puede ver en la Figura 2 este modelo consta de 7 bloques cada uno realiza diversos procesos con el fin de aumentar el número de características que se extraen de una imagen.



Figura 2. Arquitectura EfficientNetB7

Con el fin de aprovechar al máximo las características del este modelo se escoge hacer uso de algunas características obtenidas el someter el modelo al conjunto de datos imagenet, estas características son conocidas más comúnmente como pesos, para ello es importo el modelo con sus pesos y se lo entreno desde el bloque 4, 5, 6, 7, en la Figura 3 se observa más claramente de color naranja los bloques desde los cuales se entrenara el modelo, esto es con el fin de encontrar el modelo con el mayor porcentaje de aciertos, para medir esto se usó la métrica de precisión o en ingles accuracy. Como se observa en la Figura 3 adicionalmente se agregó una capa de redes neuronales convolucionales con, una capa flatten para hacer uso de algunas capas densas, una capa densa de 128 neuronas una capa dropout como método de reducción de sobreajuste y una capa de salida con 3 neuronas activadas por una función softmax, esta capa de salida se usa comúnmente en problemas de clasificación.



Figura 3. Arquitectura EfficientNetB7 modificada

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para realizar la selección del mejor modelo se usó la métrica accuracy, como se observa en la ecuación (1) esta métrica nos permite calcular el total de aciertos obtenidos sobre el total de datos.

$$Accuracy = \frac{\text{total de aciertos}}{\text{numero total de predicciones}} = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN} \quad (1)$$

Donde:

VP: verdadero positivo

VN: verdadero negativo

FP: falso positivo

FN: falso negativo

3.1 Modelo 1: Entrenamiento desde bloque 4

En la Figura 4 observamos que el modelo tuvo un pésimo desempeño por lo cual no se realizara ninguna prueba externa, en su lugar se procede a evaluar el siguiente modelo con el fin de encontrar el modelo que mejor desempeño tenga a la hora de clasificar imágenes en las 3 categorías designadas.

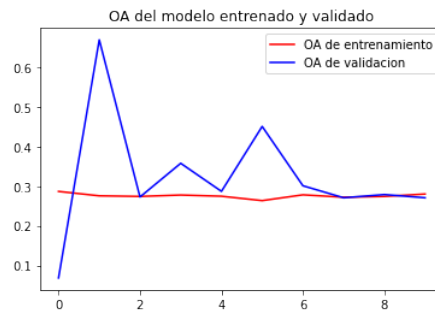


Figura 4. Entrenamiento y validación interna del modelo desde bloque 4

3.2 Modelo 2: Entrenamiento desde bloque 5

En la Figura 5 se observa que a diferencia del entrenamiento (rojo) la validación (azul) aunque presenta resultados superiores al 80% presenta algunas dificultades, aunque al aumentar el número de veces que se entrena el modelo o épocas mejora de forma significativa por lo cual se procede a realizar una prueba externa para medir la precisión del modelo frente a imágenes desconocidas.

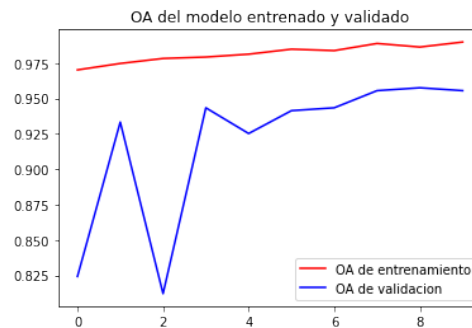


Figura 5. Entrenamiento y validación interna del modelo desde bloque 5

3.3 Modelo 3: Entrenamiento desde bloque 6

Como lo muestra la Figura 6 el entrenamiento desde el bloque 6 permite un accuracy superior al 95% tanto en entrenamiento(rojo) como en la validación interna (azul), al dar tan buenos resultados además de ello con un bajo sobreajuste podemos proceder a una prueba externa para ver el comportamiento final del modelo para finalmente proceder a seleccionar el mejor modelo.

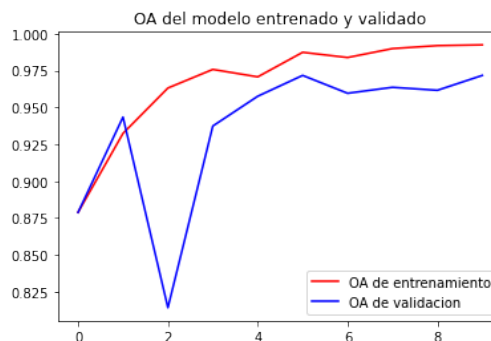


Figura 6. Entrenamiento y validación interna del modelo desde bloque 6

3.4 Modelo 4: Entrenamiento desde bloque 7

Al realizar el entrenamiento desde el bloque 7 del modelo efficientnetB7 se obtienen unos resultados significativamente altos, como se observa en la Figura 7 supero el 90% tanto en el accuracy de entrenamiento (rojo) como en la validación interna(azul), esto no permite ver un gran desempeño de este modelo por lo cual se procede a realizar la prueba externo con el fin de ver su comportamiento con imágenes las cuales nunca trabajo el modelo y ver su respuesta final.

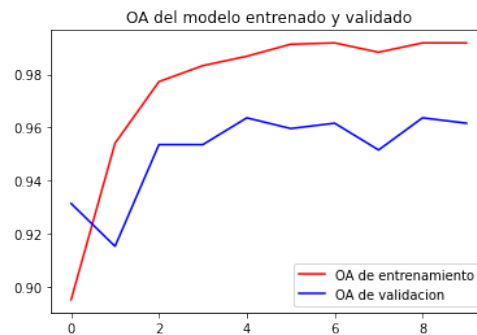


Figura 7. Entrenamiento y validación interna del modelo desde bloque 7

3.5 Validación externa

Como se observa en la Tabla 1, aunque el modelo 3 obtuvo mejores resultados que modelo 4, a la hora de enfrentarse a imágenes nuevas el modelo 4 tiene la mejor respuesta por lo cual se escoge como el modelo final para la solución del problema planteado.

Tabla 1. Resultados prueba externa

Modelo	Accuracy test (%)
1	N/A
2	77.54
3	87.08
4	90.63

4. CONCLUSIONES

En este artículo se evaluó la transferencia de aprendizaje con el modelo pre-entrenado EfficientNetB7 para la tarea de clasificación de daños en carretera. Específicamente, se utilizaron cuatro puntos de congelamiento para determinar las características que extrae la red que sean más adecuadas para la identificación correcta del tipo de daño.

De acuerdo con los resultados, a mayor profundidad de la red, se aumenta la cantidad de aciertos del clasificador, obteniendo los mejores resultados en el bloque 7 del modelo pre-entrenado. Adicionalmente, se pudo verificar que el pre-procesamiento de imágenes mejora el desempeño del clasificador.

Como trabajo futuro se propone evaluar otros modelos pre-entrenados con el mismo conjunto de datos, así como, realizar ajuste fino de los pesos de la red.

REFERENCIAS

- [1] C. Zwerling, C. Peek-Asa, P.S. Whitten, S. Choi, N.L. Sprince and M.P. Jones, "Fatal motor vehicle crashes in rural and urban areas: decomposing rates into contributing factors," *Injury prevention*, vol. 11, no. 1, pp. 24-28.
- [2] T. Kim and S. Ryu, "Review and analysis of pothole detection methods," *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 5, no. 8, pp. 603-608.
- [3] G. Ochoa-Ruiz, A.A. Angulo-Murillo, A. Ochoa-Zezzatti, L.M. Aguilar-Lobo, J.A. Vega-Fernández and S. Natraj, "An Asphalt Damage Dataset and Detection System Based on RetinaNet for Road Conditions Assessment," *Applied sciences*, vol. 10, no. 11, Jun 08, pp. 3974.
- [4] W. Wang and C. Su, "Convolutional Neural Network-Based Pavement Crack Segmentation Using Pyramid Attention Network," *Access*, vol. 8, pp. 206548-206558.
- [5] X. Feng, L. Xiao, W. Li, L. Pei, Z. Sun, Z. Ma, H. Shen and H. Ju, "Pavement Crack Detection and Segmentation Method Based on Improved Deep Learning Fusion Model," *Mathe. problems in engin.*, vol. 2020, Dec 10, pp. 1.
- [6] I. Sutrisno, A.W. Syauqi, M.K. Hasin, Iskandar, M.B. Rahmat, I.P.S. Asmara, I. Suwondo, Ardiansyah, D. Wiratno and E. Setiawan, "Design of Pothole Detector Using Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) And Neural Network (NN)," *IOP conference series. Materials Science and Engineering*, vol. 874, no. 1, Jun 01, pp. 12012.
- [7] S. Shim and G. Cho, "Lightweight Semantic Segmentation for Road-Surface Damage Recognition Based on Multiscale Learning," *Access*, vol. 8, pp. 102680-102690.

- [8] S. Gupta, P. Sharma, D. Sharma, V. Gupta and N. Sambyal, "Detection and localization of potholes in thermal images using deep neural networks," *Multimedia tools and applications*, vol. 79, no. 35-36, Sep, pp. 26265-26284.
- [9] J. Jo and Z. Jadidi, "A high precision crack classification system using multi-layered image processing and deep belief learning," *Structure and infrastructure engineering*, vol. 16, no. 2, Feb 01, pp. 297-305.
- [10] H. Chen, M. Yao and Q. Gu, "Pothole detection using location-aware convolutional neural networks," *International journal of machine learning and cybernetics*, vol. 11, no. 4, Apr, pp. 899-911.
- [11] A. Angulo, J. A. Vega-Fernández, L. M. Aguilar-Lobo, S. Natraj, and G. Ochoa-Ruiz, "Road damage detection acquisition system based on deep neural networks for physical asset management," in *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 2019, pp. 3-14.
- [12] R. Roberts, G. Giancontieri, L. Inzerillo and G. Di Mino, "Towards Low-Cost Pavement Condition Health Monitoring and Analysis Using Deep Learning," *Applied sciences*, vol. 10, no. 1, Jan 01, pp. 319.
- [13] S. Distrital, "Banco Distrital de Programas y Proyectos Alcaldía Mayor de Bogotá, Recuperado: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/408_227_unidad_administrativa_especial_de_rehabilitacion_y_mantenimiento_vial_0.pdf
- [14] C. Tan, F. Sun, T. Kong, W. Zhang, C. Yang, and C. Liu, "A survey on deep transfer learning," In *International conference on artificial neural networks*, 2018, pp. 270-279.
- [15] K. Team, "Keras documentation: Keras Applications", Keras.io, 2021. Recuperado: <https://keras.io/api/applications/>

Fusión de datos para información descentralizada: Una revisión del estado del arte

Juan Pablo Vélez Uribe¹

Fernán Alonso Villa Garzón²

¹*Politécnico Gran Colombiano*

²*Universidad Nacional de Colombia*
Colombia

Este capítulo se enfoca en el desarrollo de la revisión de la literatura y la importancia de la fusión de datos FD en sus diversas áreas de aplicación. Se tratan tópicos como autores más relevantes, revistas, países y temas de interés relacionados con la fusión de datos y los impactos que ha tenido para el desarrollo y el entendimiento de diferentes fenómenos en áreas como la medicina, las Ciencias computacionales, las matemáticas, la astronomía y la seguridad. Se realiza un acercamiento al proceso y los pasos necesarios de las técnicas de FD y cómo ha venido tomando cada vez mayor importancia en áreas como el reconocimiento de objetos, la inteligencia artificial, el deep learning y las bases de datos. Es de entender que la fusión de datos es un proceso que integra información de diferentes archivos con el fin de obtener uno único que proporcione más información y confiabilidad.

¹ Magíster en Ingeniería Administrativa.

Contacto: jpvelezu@poligran.edu.co

² Doctor en Ingeniería de Sistemas

Contacto: favillao@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversas teorías y métodos para combinar, relacionar e integrar información que proviene de diferentes fuentes y representan el mismo fenómeno. A nivel global ocurren eventos de diferente índole y en diferentes áreas estratégicas. Estos aunque ocurren en lugares diferentes, presentan, describen y clasifican información de fenómenos muy similares, sin embargo no se correlacionan y tampoco se agrupan para el análisis de comportamiento, resultados y conclusiones, lo que hace que queden como sucesos aislados que en ocasiones no aportan una solución concreta por la falta de datos o por qué, los que hacen falta los completan bajo un tratamiento estadístico ya sea descriptivo o cuantitativo suponiendo los datos, lo que hace que los resultados arrojados sean erróneos, bajo estos hechos se busca una metodología que realice una correlación con datos validos que suceden en diferentes lugares pero en fenómenos similares, en los cuales se presentan bloques de datos completos ausentes [8].

Para esto se requiere que un archivo de datos este completo para que luego sea procesado por los analistas por medio de herramientas para minería de datos como Pentaho, Rapid Miner, WEKA, Orange, KNIME, SAS, [22], que permiten gestionar datos, identificar las posibles tendencias y los patrones más significativos en volúmenes de información muy elevados y dentro de estas se destacan actividades que estas herramientas ejecutan tales como la clasificación de los datos, el análisis de los valores atípicos o de desviaciones, el análisis de clúster, el análisis de correlación, el análisis de la regresión y los análisis predictivos, todo esto con el objetivo de tomar decisiones bajo una situación determinada, por tal motivo se utiliza la metodología de Fusión de datos [31], la cual integra las herramientas mencionadas más estadísticas que permiten por medio de estimaciones y análisis, tomar un bloque de datos de un fenómeno (donante) y ponerlo en un fenómeno similar que este cercano a este (Receptor) con el fin de completar un archivo y así poder analizarlo de forma más profunda y detallada, a lo que se llama la técnica de imputación HOT- DECK con el empleo de algoritmos de aprendizaje continuo.

La fusión de datos ha sido utilizada para completar archivos y solucionar problemas en áreas como la medicina, el transporte, los bancos, los factores climáticos, los factores poblacionales, los factores energéticos entre otros y para tener una fuente única de datos frente a la necesidad de conseguir el máximo de información posible al menor costo. Por tal motivo se pretende hacer una aproximación de los pasos que se deben seguir para fusionar datos con eventos ocurridos en diferentes lugares, que se puedan clasificar y caracterizar para la unión, integración, sinergia o fusión de los datos con el objetivo de tener mayor conocimiento del fenómeno y obtener resultados más detallados que le permitan a los usuarios tomar la decisión más acertada en cada una de las situaciones abordadas.

El alcance que se pretende es la generación de la completación del archivo con el objetivo de dejarlo disponible para su respectivo tratamiento. Para esto es necesario la creación del proceso de fusión de datos en el que se tenga claro cada uno de los pasos a seguir o un protocolo, así como su debida clasificación permitiendo que se elimine los posibles errores y ajuste el archivo de forma tal que la calidad de este le permita a las personas que procesan los datos o a los software utilizados poder procesar y analizar de forma efectiva el archivo para obtener información relevante para la toma de decisiones o para el análisis de situaciones que contengan una diversidad de variables pero que se aplique a un mismo contexto.

2. MARCO CONCEPTUAL

En la actualidad existen un mar de información de diversos eventos sin embargo en ocasiones se requiere compilarla y organizarla para poder entender el fenómeno que está ocurriendo, pero no se tiene claridad de cómo hacerlo.

Esto es de suma importancia debido a que el proceso que se realiza debe garantizar que la información se organice, se estructura y se consolide para poder interpretarla, de esta manera es que se opta por las nuevas técnicas o tendencias en integración o fusión de datos que garantizan que se obtenga un archivo único con las propiedades de calidad y homogeneidad que se requieren, dada la situación se realizara una estructura que sirva como guía para realizar este procedimiento, lo que traerá como beneficios finales mayor conocimiento de los fenómenos ocurridos y que así se puedan tomar decisiones más acertada y se

reduzcan los riesgos en diferentes contextos. Esto traerá una evolución científica para el tratamiento de datos que permitirá reducir los tiempos y estructurar soluciones más eficientes y eficaces en la parte académica y profesional. También reducirá los costos de la toma de la información en diferentes lugares y por diversos medios ya que, al fusionar los datos, no es necesario que las personas tengan que trasladarse o gastar dinero en documentación, archivos o personal que se pueden utilizar en otras actividades.

En la Figura 1 se muestra un arquetipo en el cual se puede ver de acuerdo con el giro de las flechas internas las variables que se correlacionan y que influyen en la fusión de datos para que esta se pueda llevar a cabo de una forma secuencial y organizada, teniendo en cuenta factores internos como las personas, los equipos, el software y factores externos como los fenómenos o situaciones que nos arrojan diferentes tipos de datos para ser procesados.

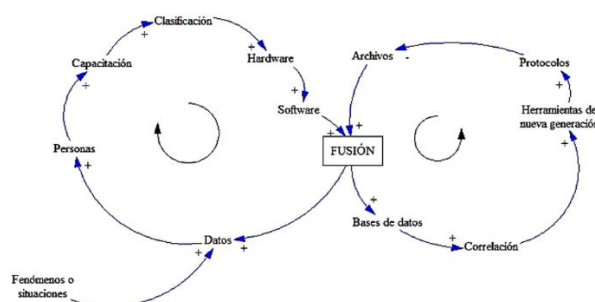


Figura 1. Arquetipo para la Fusión de Datos

3. MÉTODO

El problema de investigación está basado en realizar la completación de archivos, combinando e integrando de forma óptima múltiples fuentes de información redundantes, [11], y herramientas como la minería de datos, procesos como la inteligencia artificial, el machine learning y el Deep Learning que permitan tener un archivo único que cuente con las características funcionales, la solides y confiabilidad, así como su protocolo de construcción de tal manera que en el momento en que este sea utilizado o procesado para la solución de un problema, pueda arrojar la mejor solución posible a este. Para esto se tomará información de la aplicación de la fusión de datos en diferentes líneas temáticas como la ingeniería, las Ciencias computacionales, la física, la salud y la astronomía, con los cuales se construirá un protocolo que permita realizar el proceso con series de tiempo de sucesos o eventos ocurridos.

3.1 Preguntas de Investigación

- ¿Para qué sirve la Fusión de Datos?
- ¿Cómo integrar la fusión de datos en las diferentes áreas de aplicación?

3.2 Proceso de búsqueda

Tabla 1. Proceso de búsqueda

Secuencia de Actividades	
1	Definición del tema <i>Fusión de Datos</i>
2	Palabras Claves para formular las ecuaciones de búsqueda. (Fusión de Datos. Integración de Datos, protocolos, series de tiempo, data fusión and Deep learning, problems in data fusión)
3	Selección de las bases de datos en las cuales se realizará la búsqueda (Scopus, Sciense Direct, Springer, IEEE)
4	Filtros (Tema, número de citaciones, área de aplicación, autores, revistas, países)
5	Clasificación (Se seleccionan los artículos más citados y que tengan mayo relación con la fusión de datos, sus problemas y protocolos)
6	Análisis de los artículos más relevantes para extraer la información que se requiere para la fusión de datos.

4. RESULTADOS

En el diagrama Ishikawa (Figura 2) podemos ver las causas y las sub-causas que originan el problema para el proceso de la fusión de datos, en este se observa de forma clara que los factores que más influyen son la

falta de conocimiento y capacitación de las personas, la falta de equipos y software que no permiten que los datos se envíen y sean centralizados para luego hacer el proceso de fusión (Figura 3) que se requiere para obtener un archivo único.

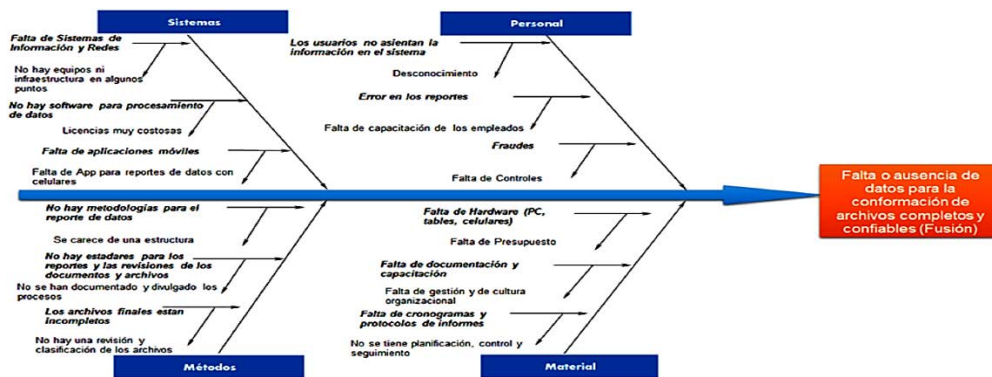


Figura 2. Diagrama Ishikawa de los problemas en la Fusión de Datos

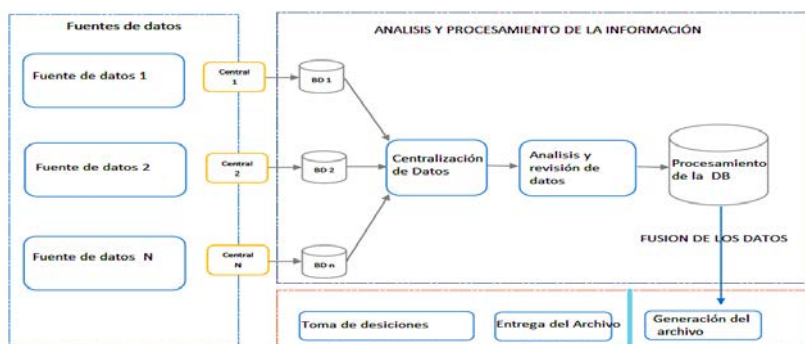


Figura 3. Proceso de Fusión de Datos [7]

Al revisar las líneas temáticas más importantes en la fusión de datos se puede ver que las líneas predominantes son la de ingeniería y las Ciencias computacionales (Tabla 2), y a su vez dentro de estas todo lo que tiene que ver con temas como procesamiento de imágenes, sensores, y procesamiento de datos con aplicaciones matemáticas. Ahora bien, en la búsqueda se debe tener en cuenta que, aunque pueden aparecer un número mayor de artículos se debe realizar la filtración y clasificación de la información que tiene una relación más directa con el proceso de fusión de datos (Figura 4).

Tabla 2. Artículos más citados por línea Temática

	Artículo	Área
1	Fusión de imágenes satelitales de diferentes resoluciones espaciales: evaluación de la calidad de las imágenes resultantes [47]. Citaciones: 771	Ingeniería
2	Comparación de tres métodos diferentes para fusionar datos multiresolución y multispectrales: Landsat TM y SPOT pancromático [10]. Citaciones: 1019	Ingeniería
3	Fusión de información para redes de sensores inalámbricos: métodos, modelos y clasificaciones [33]. Citaciones: 402	Ciencias computacionales
4	Teledetección de múltiples fuentes la fusión de datos: Estado y tendencias [51]. Citaciones: 345	Ciencias computacionales
5	La fusión de datos de imágenes satelitales de alta resolución y datos LiDAR para extracción automática de edificios [42]. Citaciones: 341	Ciencias computacionales
6	Métodos secuenciales de Monte Carlo para el seguimiento de múltiples objetivos y la fusión de datos [19]. Citaciones: 318	Ciencias computacionales
7	Fusión de imagen: el concepto ARSIS y algunos esquemas de implementación exitosos [4]. Citaciones: 286	Física y astronomía
8	Avances en la fusión de datos multisensor: Algoritmos y aplicaciones [12]. Citaciones: 178	Bioquímica, Genética y Biología Molecular
9	Desde la adquisición de datos hasta la fusión de datos: Una revisión exhaustiva y una hoja de ruta para la identificación de actividades de la vida diaria utilizando dispositivos móviles [35]. Citaciones: 74	Bioquímica, Genética y Biología Molecular
10	Detección de edificios mediante fusión de datos de escáner láser en el aire e imágenes multispectrales: evaluación del rendimiento y análisis de sensibilidad [36]. Citaciones: 148	Ciencias de la tierra y planetarias



Figura 4. Comparación de artículos más citados por línea temática vs total de artículos por línea

En los artículos hot (Tabla 3) del momento podemos ver de nuevo las líneas de Ciencias computacionales, ingeniería, física y astronomía y los temas de punta siguen siendo imágenes, sensores, tratamiento matemático y estadístico de datos. Aunque en el área de la medicina, la fusión de datos también es mencionado en diversas áreas como la cardiología, la neurología y algunas operaciones quirúrgicas.

Tabla 3. Artículos Hot

Artículo	Área
1 Recuperación de mapas de radiancia de alto rango dinámico de fotografías [13]	Ciencias de la tierra y planetarias
2 Una introducción a la fusión de datos multisensor [18]	Ciencias computacionales
3 Fusión de información en biometría [38]	Física y astronomía
4 Medida de rendimiento de fusión de imagen objetiva [49]	Ingeniería
5 Fusión de datos multisensor: Una revisión del estado del arte [25]	Ciencias computacionales
6 Fusión de imagen basada en múltiples resoluciones con descomposición aditiva de wavelet [7, 23]	Física y astronomía
7 La fusión óptima de datos en sistemas de detección de sensores múltiples [50]	Ciencias computacionales
8 Un modelo de difusión de datos de dos niveles para redes de sensores inalámbricos a gran escala [48]	Ingeniería
9 Un método de transformación wavelet para fusionar datos pancromáticos Landsat TM y SPOT [24]	Física y astronomía
10 Fusión basada en el contexto de imágenes de alta resolución espacial y espectral basadas en un análisis multiresolución sobre muestreo [4]	Ingeniería

En los artículos tipo survey (Tabla 4 y Figura 5) podemos ver que las publicaciones en los últimos 20 años han venido creciendo en el área de Fusión de datos, aunque el tema viene ya hace más de 50 años solo en los últimos 10 años se ha aplicado a diversas líneas de investigación (Figura 6) trayendo resultados favorables para el desarrollo científico, académico y profesional.

Tabla 4. Artículos tipo Survey

Área	Cantidad	Cuándo
Ciencias computacionales	11599	2000 - 2020
Ingeniería	8857	2000 - 2020
Medicina	3874	2000 - 2020
Matemáticas	3219	2000 - 2020
Física y astronomía	2795	2000 - 2020
Bioquímica, genética y biología	2328	2000 - 2020
Ciencias de la tierra y planetarias	2093	2000 - 2020

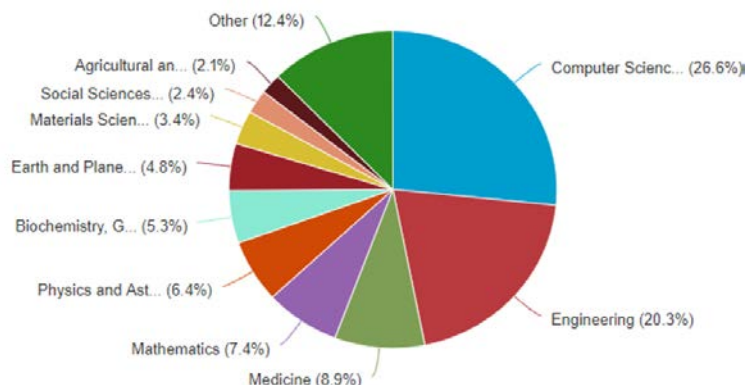


Figura 6. Porcentaje por línea temática de artículos tipo survey

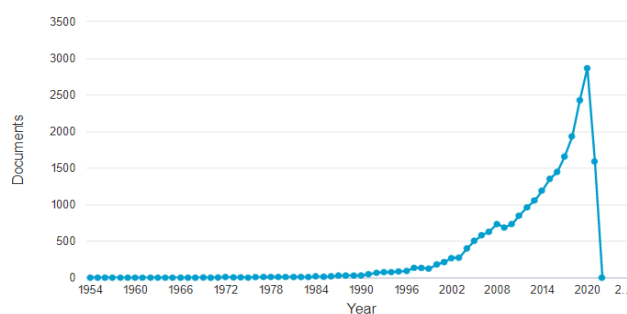


Figura 6. Gráfica de crecimiento en la investigación en el tema de fusión de datos

Se puede ver que la mayor parte de las revistas en las que se trata el tema de fusión de datos es en el área de la salud y aunque se publica más en las otras líneas, el área de la salud, la electrónica, las comunicaciones y la economía tiene mayor número de revista que hablan del tema tal, y como lo evidencia la Tabla 5.

Tabla 5. Revistas en el área por factor de impacto

Revistas	Artículos
1 Revista Iberoamericana de automática e Informática industrial RIAI	22
2 Journal of South American Earth Sciences	21
3 Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica	13
4 Journal of Optometry	13
5 Revista Española de Cardiología	12
6 Medicina Clínica	11
7 Archivos de Bronconeumología	11
8 American Heart Journal	8
9 Estudios Gerenciales	8
10 Brazilian Journal of Anesthesiology	7

Las conferencias acerca de la fusión de datos no son muy abundantes, pues se viene aumentando el número de congresos y simposios del tema año tras año debido a los resultados validados en las diversas líneas y en las áreas que estas los componen (Tabla 6).

Tabla 6. Principales conferencias en el área y sus líneas temáticas

Conferencia	Área	Citas
1 Conferencia Internacional sobre fusión de Información (2018) [41]	Ciencias computacionales	42
2 Simposio sobre fusión de datos de sensores: tendencias, soluciones, aplicaciones (2017) [43]	Ciencias computacionales	39
3 Simposio 2019 sobre fusión de datos de sensores: tendencias, soluciones, aplicaciones (2019) [34]	Ciencias computacionales	26
4 Actas del simposio australiano de fusión de datos ADFS 1996 [1]	Ingeniería	39
5 Conferencia Internacional IEEE sobre fusión e integración de sensores múltiples para sistemas inteligentes (2016) [6]	Física y Astronomía	14

En cuanto a los autores más citados (Tabla 7) se puede evidenciar como referentes en las líneas de la ingeniería, las Ciencias computacionales, física y astronomía, y también se puede ver que se asocian a los países y áreas en que más se publica: China, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y Francia (Tabla 8).

Tabla 7. Autores más citados

Autores
1 [13]. Debevec, Paul E. Malik, Jitendra (1769 citaciones)
2 [18]. Hall, DL and Llinas. J. (1735 citaciones)
3 [38]. Ross, A and Jain, A (1070 citaciones)
4 [49]. Xydeas, CS and Petrovic, V (1038 citaciones)
5 [25]. Khaleghi, B. Khamis, A. Karray, FO. Razavi, SN (977 citaciones)
6 [23]. Nuñez, J. Otaxu, X. Fors, O. Prades, A. Pala, V. Arbiol, R (923 citaciones)
7 [50]. Silla, Z. Varshney, PK (865 citaciones)
8 [48]. Ye, F. Luo, H. Cheng, J. Lu, S. Zhang, L (787 citaciones)
9 [24]. Zhou, J. Civco, DL. Silander, JA. (630 citaciones)
10 [4]. Aiizzi, B. Alparona, L. Baronti, S. Garzelli, A (536 citaciones)

Tabla 8. Principales líneas de investigación del área en las que más se publica

	Líneas de Investigación	Área
1	Salud	Bioquímica, genética y biología molecular
2	Tratamiento de imágenes	Ciencias computacionales
3	Tratamiento de datos	Ciencias computacionales
4	Resolución de problemas de ingeniería	Ingeniería
5	Desarrollos tecnológicos	Ingeniería

La jerarquía de las áreas temáticas (Tabla 9) viene dada por el número de artículos, el de citas, conferencias y autores más citados.

Tabla 9. Jerarquía de importancia de las áreas temáticas

	Área Temática
1	Ciencias computacionales
2	Ingeniería
3	Física y Astronomía
4	Ciencias de la tierra y planetarias
5	Biología Molecular

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- *Automated Target Recognition:* Uno de las herramientas más potentes en la ciencia, la tecnología y la ingeniería es el reconocimiento automático de objetos, estas técnicas pueden facilitar el hallazgo de personas, maquinas, terrenos, minas y diferentes tipos de objetos con diferentes tipos de geometrías, tamaños, pesos y colores, estas se basan en un procedimiento intrínseco de integración de las información, la cual capta imágenes que integra por medio de colores, puntos o pixeles, después realiza una extracción de las características por medio de patrones para finalmente realizar la clasificación apoyados en un software que les permite reconocer y hallar el objeto que se está buscando [39].
- *Artificial intelligence:* los humanos se enfrentan día a día a situaciones que requieren de conocimiento, experiencia y el apoyo en ocasiones de herramientas computacionales, esto dado a que se quiere minimizar los riesgos al máximo en la toma de las decisiones, por esto nace la Inteligencia Artificial Como una herramienta fundamental que funciona tomando los datos, procesándolos, simulándolos, aprendiendo de estos y generando las mejores opciones para tomar las decisiones más adecuadas, todo esto basado en algoritmos que van guardando toda la información para utilizarla las veces que se requiera sin incurrir en los riesgos que un humano podría materializar ya sea por descuido, por la parte emocional o afectiva [27].
- *Neural Networks:* En la fusión de datos se utilizan distintos tipos de herramientas que ayudan a estructurar y caracterizar la información, una de estas son la redes neuronales RN, las cuales por medio de información histórica, generalmente series de tiempo se procesan basados en unos patrones y luego se entrena la red dándole unos parámetros que dan como resultado una predicción o aproximación de los eventos futuros a ocurrir, para esto se usan funciones metamatemáticas que hacen más exacto el resultado de lo que se está buscando. Estas se están aplicando en áreas como el transporte, la salud, el medio ambiente, la economía, los bancos, el clima entre otros y han dado resultados muy efectivos en sus predicciones [46].
- *Statistical matching:* En la actualidad este tema es de gran importancia y uso cuando se trata de hacer tratamientos estadísticos de diferentes muestra de datos de una población, un fenómeno, una medición u otro tipo de recolección de datos, esto debido a que no permite obtener un archivo objetivo o un resultado único más completo ya que este se basa en el tratamiento de bases de datos a las cuales se les extraen unas variables comunes para hacerles una armonización, luego una recodificación y finalmente se integran o se fusionan bajo un modelo que tiene como condición que las distribuciones de las bases de datos sean similares para así hacer el matching entre un donante y un receptor, dando esto como resultado un archivo con una información consolidada que le permite a los analistas tener mayor capacidad de análisis y menor desviación en la toma de decisiones [28].

- *Relational databases*: En la actualidad en las empresas, corporaciones, instituciones educativas se maneja un volumen de información masificada que generalmente es almacenada como conjuntos de datos que se clasifican de acuerdo a su características, estas deben tener entre si unas relaciones entre atributos y objetos que les permiten ser estructuradas para así obtener información más concreta de los archivos, los tipos de relaciones son diferentes pero en el caso de las bases de datos estas tienen una interacción entre niveles que permite tener mayor correlación dando como resultados tablas que brindan la suficiente información para realizar un tratamiento a los datos bajo diferentes técnicas como la de fusión de datos, integración de datos o Matching estadístico que permite obtener archivos únicos y consistentes para trabajar con estos [44].
- *Deep Learning*: Es uno de los dominios más usados en la actualidad para la fusión de datos (archivos alfanuméricos, imágenes, tablas y videos) (Figura 7), utiliza sistemas conexionistas, redes neuronales y representación dispersa en conjunto con técnicas de filtrado de datos que permiten obtener mayor información de cada uno de los archivos para procesarlos, aprender de los errores detectados en el proceso y de forma automática generar un aprendizaje que le permite en cada iteración minimizar el error y tener un resultado más refinado y exacto del archivo final obtenido [29].

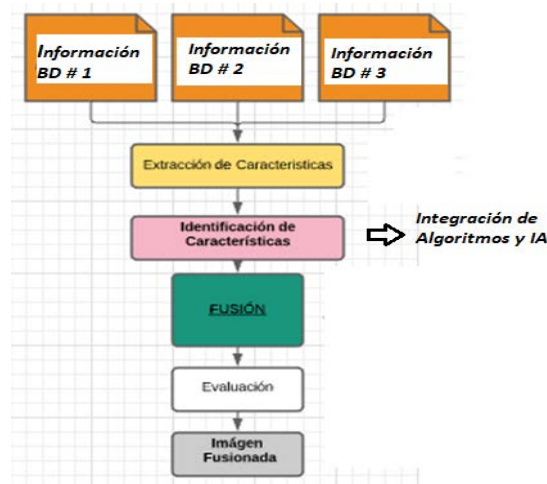


Figura 7. Pasos para la fusión de datos y su explicación [7]

- Paso 1: En el primer nivel se encuentran las bases de datos extraídas de un fenómeno similar, pero de diferentes fuentes, las cuales pueden tener ubicaciones diferentes ya sea en un país, en una ciudad o región.
- Paso 2: En el segundo nivel ingresan todos los archivos de las bases de datos y estos se estructuran con el fin de detectar los datos atípicos o diferentes que se encuentren en cada uno de los archivos, así como los datos similares.
- Paso 3: Este es el tercer nivel en el cual se identifican las características y se aplican los procesos lógicos para poder fusionar los datos, por lo que se integran algoritmos y herramientas de inteligencia artificial que permiten hacer el proceso de filtrado, aprendizaje, predicción e integración de cada una de las características para lograr un archivo único.
- Paso 4: Este es el cuarto nivel en el que ingresa el archivo final realizado en el nivel 3 y se analiza el archivo final fusionado con el fin de determinar la calidad y confiabilidad de este.
- Paso 5: Se evalúa el archivo por medio de las ecuaciones o métricas establecidas como la varianza, la desviación estándar o los gradientes entre otras que existen para determinar la calidad de la fusión.
- *Arquitecturas en la Fusión de Datos*: es la estructura donde se realiza la fusión de datos y se selecciona basados en la necesidad, la demanda, las conexiones existentes, la disponibilidad de los datos y el orden del sistema. Dado esto se pueden identificar las siguientes arquitecturas:
 - Arquitectura de fusión de datos centralizada: Existe un único nodo que realiza la alineación (Figura 8).

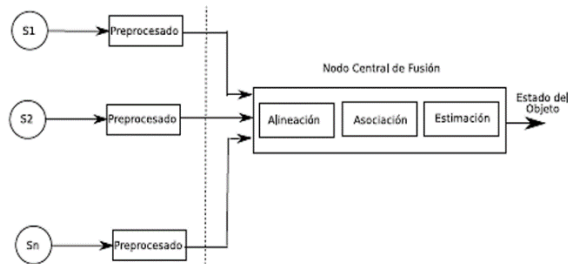


Figura 8. Arquitectura de Fusión centralizada [14]

- Arquitectura de fusión descentralizada: cada nodo puede procesar, alinear, asociar y estimar los datos (Figura 9).

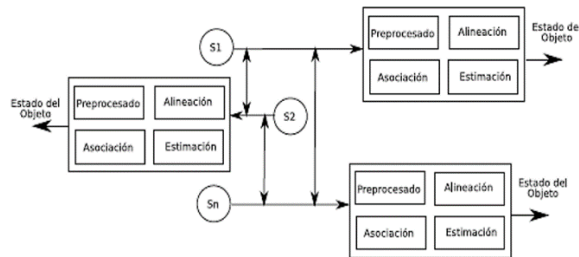


Figura 9. Arquitectura de Fusión descentralizada

- Arquitectura de Fusión de datos distribuida: se realiza un proceso de los datos en cada nodo, pero la fusión de datos se lleva a cabo en un único nodo (Figura 10).

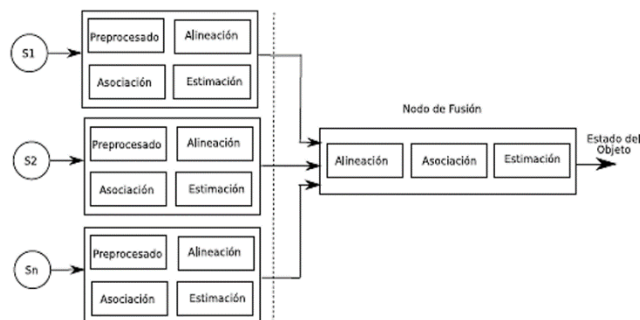


Figura 10. Arquitectura de Fusión distribuida

- Algoritmos utilizados para la fusión de datos:* Esta es la herramienta con la que se le da un orden lógico a la información que ingresa, genera correlaciones, aplica reglas de filtrado, tiene parámetros de aprendizaje y detecta y minimiza errores en el proceso de fusión hasta dar como salida un archivo con características más completas y con menos errores. Se debe entender que cada uno de los algoritmos a continuación tiene una aplicación específica las cual puede estar dentro de la rama de los datos, las imágenes o las tablas, así como dentro de estas se generan unas subcategorías de acuerdo con el tipo de dato (datos financieros, datos meteorológicos, imágenes satelitales, medicas, tablas estructuradas o sin estructurar).

- Lógica Difusa [48]
- Filtros de Kalman [2]
- Probabilística [21]
- Multiagente [9, 11]
- Estimación clásica [20]
- Agentes Móviles [9, 11]
- Redes neuronales [48]
- Mínimos cuadrados [20]
- Basado en distancias [20]
- Redes bayesianas [3]

- *Aplicaciones de la fusión de datos en diferentes áreas de aplicación*
 1. Ciencias computacionales: En esta área se ha desarrollado muchas aplicaciones en la fusión de datos, en especial en aquellas relacionadas con Deep Learning y todo lo que tiene que ver con sistemas cibernéticos, físicos y sociales, en el ámbito de la privacidad de los datos captados por las redes [17].
 2. Medicina: En la medicina la fusión de datos se ha utilizado para detectar diferentes tipos de cáncer de pulmón, cerebrales, Covid-19 y para hacer fusión de información en el área coronaria, de la sangre, las células e incluso del ADN de las personas [5, 32]
 3. Espaciales: En el área espacial la fusión de datos se ha utilizado para tomar datos de temperaturas, presiones e imágenes en la luna, en el sol y en marte, así como también se han utilizado los satelitales para tomar información de la superficie terrestre como la de los mares, los humedales, los desiertos, las zonas tropicales y los bosques [16].
 4. Reconocimiento de objetos: En el área de reconocimiento de objetos se han desarrollado métodos de fusión de datos para reconocimiento de personas, defectos en máquinas y equipos, fallas en materiales entre otros que han ayudado al perfeccionamiento de los productos en la industria o al mejoramiento de la seguridad en los países [40].
 5. Bases de datos: en esta área la fusión de datos a realizado aporte significativos en la información de los bancos, información de ventas de almacenes de grandes superficies, votaciones, censos poblacionales, movimientos migratorios, precios de la bolsa de energía, divisas internacionales, datos registrados de estaciones meteorológicas y de calidad del aire entre otras [45].
- *Beneficios de la fusión de Imágenes:* Los datos siempre han sido la materia prima más importante para el análisis de una situación, la toma de decisiones y el descubrimiento de patrones y fenómenos en diferentes contextos, más cuándo se clasifican, se estructuran y se correlacionan con el objetivo de eliminar los defectos o distorsiones de las diversas fuentes que pueden llegar a ser redundantes e inconsistentes por lo tanto los beneficios que trae la fusión son los siguientes:
 - Redundancia: ayuda a mejorar la fiabilidad del sistema debido a que reduce la incertidumbre de las medidas individuales al observar con distintos sensores de diferente precisión.
 - Complementariedad: permite observar ciertas características del entorno que son imposibles de observar con sensores individuales.
 - Oportunidad: permite captar la información que primero esté disponible aumentando la velocidad del sistema sensorial.
 - Costos de la Información: La integración de distintos sensores permite que el coste del sistema sea menor que si se utilizase un solo sensor.
 - Separación: se puede realizar una separación entre los conocimientos nuevos y los anteriores.
 - Mejoras en los costos computacionales y flexibilidad en los diseños [30].

A parte de lo mencionado anteriormente brindan más confiabilidad, más información y reducen los riesgos ya que las técnicas, los algoritmos, tecnología y la exactitud son mejoradas por los modelos haciendo de estos archivos de un alto valor para los que trabajaran con estos. Aunque se mencionaron varios beneficios también se debe tener en cuenta que hay muchos desafíos y desarrollos que se deben llevar a cabo en la fusión de datos sobre todo en áreas como desarrollos de sistemas que sean capaz de incorporar los datos duros y suaves. [26], sistemas de fusión de datos en entornos dinámicos y procesamiento en tiempo real. [15] y la incorporación de fusión de datos en sensores inteligentes. [37]

6. CONCLUSIONES

De la revisión realizada del tema de fusión de datos se puede decir que este ha venido creciendo en algunas áreas de conocimiento en especial en las Ciencias computacionales, la ingeniería, la física, la Astronomía y la salud de tal manera que se han desarrollado metodologías y diferentes formas de realizar este proceso,

como en el área de la estadísticas que es llamado Match Estadístico, en el área de los datos es llamado integración de datos y en el área de las imágenes que es llamado fusión de imágenes, sin embargo, lo que se pretende con cualquiera de estos es generar un archivo único y confiable que sirva para ser analizado y procesado.

Por lo tanto, se debe tener en cuenta que para realizar el proceso de fusión de datos desde cualquier área se deben seguir unos pasos que garanticen que la información sea clara, verídica, estructurada, clasificada y bien correlacionada con el objeto de obtener un archivo único que tenga la consistencia y que brinde confiabilidad.

Esta metodología o protocolo de fusión ha hecho que la ciencia y la investigación puedan avanzar y encontrar soluciones que antes no eran posibles, ha hecho que muchos de los proyecto puedan ser finalizado y que se tomen decisiones más acertadas reduciendo el riesgo y esto gracias a que está integrada con nuevas tendencias como la inteligencia artificial, el *big data*, la redes neuronales, la estadística y los modelos matemáticos de nueva generación que hacen que los resultados de los archivos resultantes de la fusión de datos sean valiosos y exitosos a la hora de procesarlos, motivo por el cual las grandes potencias a nivel mundial como estados unidos, china y Alemania ahondan esfuerzos cada vez mayores en esta área.

REFERENCIAS

- [1] ADFS - "Australian data fusion symposium". Paper presented at the ADFS 1996 - *Australian Data Fusion Symposium*, 1996.
- [2] M. Aranda. "Estudio y aplicación del Filtro de Kalman en fusión de sensores en UAVs. Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.
- [3] A. Stassopoulou, M. Petrou & J. Kittler "Aplicación de una red bayesiana en un sistema de toma de decisiones basado en SIG", *International Journal of Geographical Information Science*, 12: 1, 23-46, 1998.
- [4] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti y A. Garzelli, "Fusión impulsada por el contexto de imágenes de alta resolución espacial y espectral basadas en análisis de resolución múltiple sobremuestreada", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 10, pp. 2300-2312, octubre de 2002.
- [5] Bartlett, T. "Fusion of single-cell transcriptome and DNA-binding data, for genomic network inference in cortical development". *BMC Bioinformatics*, 22(1), 2021.
- [6] Bouvry, P., Chaumette, S., Danoy, G., Guerrini, G., Jurquet, G., Kuwertz, A., . . . Sander, J. "Using heterogeneous multilevel swarms of UAVs and high-level data fusion to support situation management in surveillance scenarios." *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 0 424-429, 2016.
- [7] B. Meher, S. Agrawal, R. Panda, and A. Abraham, "Una técnica novedosa de fusión de imágenes multimodal basada en regions que utiliza un aprendizaje de diccionario mejorado.", 2019.
- [8] C. Juarez, "Fusión de datos: Imputación y Validación" Universidad Politecnica de Cataluña. 2004
- [9] F. Castanedo, García, J., Patricio, "Una arquitectura multiagente basada en el modelo BDI para la fusión de datos en redes de sensores visuales. Rachin T., *J Intell Robot Systems*", 2011
- [10] J. Chávez, Lados, SC., Anderson, JA. "Comparación de tres metodos diferentes para fusionar datos multirresolución y multispectral: Landsat TM y SPOT pancromático". *Revista de Ingenieria Fotogramétrica y teledetección*. Vol. 57. 3, pp. 295-303, 1991.
- [11] F. Castanedo, "Fusión de datos distribuida en redes de sensores visuales utilizando sistemas multiagente." Universidad Carlos III de Madrid. España, 2010.
- [12] J. Dong, Zhuang, D., Huang, Y., Fu, J., "Avances en la fusion de datos multisensory: Algoritmos y aplicaciones" Instituto de Ciencias geograficas e investigación de recursos naturales. China, 2009.
- [13] P. Debevec, Malik J., "Recuperación de mapas de radiancia de alto rango dinámico de fotografías" Universidad de California, 1997.
- [14] H. Durrant & Stevens, M., "Data fusion in decentralized sensing networks." *4th International Conference on Information Fusion*, Montreal, Canada, (pp. 302 - 307), 2001.
- [15] N. Faouzi, Leung, H. y Kurian, A., "Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – a survey", *Information Fusion*, 12, 4-10, 2011
- [16] W. Gao, Shen, F., Tan, K., Zhang, W., Liu, Q., Lam, N. S. N., & Ge, J., "Monitoring terrain elevation of intertidal wetlands by utilising the spatial-temporal fusion of multi-source satellite data: A case study in the yangtze (changjiang) estuary". *Geomorphology* 383, 2021.
- [17] N. Gati, Yang, L. T., Feng, J., Nie, X., Ren, Z., & Tarus, S. K., "Differentially private data fusion and deep learning framework for Cyber-Physical-Social systems: State-of-the-art and perspectives." *Information Fusion*, 76, 298-314, 2021.

- [18] D. Hall y Llinas J., "Una Introducción a la fusión de datos multisensor". Universidad de Pensilvania, 1997.
- [19] C. Hue, Le Cadre, J.-P., Pérez, P. "Métodos secuenciales de Monte Carlo para el seguimiento de multiplex objetivos y la fusión de datos" *Transacciones IEEE sobre procesamiento de señales*. Vol. 50, No. 2, pp. 309-325, 2002.
- [20] I. Jara, "Registración y fusión de imágenes médicas mediante técnicas de optimización estadística e inteligencia computacional" Universidad Nacional del Mar de Plata, 2019.
- [21] J.D. Gispert, S. Reig, J. Pascau, V. Molina, A. Santos, M. Desco., "Técnicas de cuantificación de imágenes PET (tomografía por emisión de positrones): Aplicación al estudio de la esquizofrenia", Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [22] J. Naisbitt., "Software de data Mining", Digital Guide, 2020.
- [23] J. Núñez, X. Otazu, O. Fors, A. Prades, V. Pala y R. Arbiol., "Fusión de imagen basada en multiresolución con descomposición aditiva de wavelet", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 3, pp. 1204-1211, mayo de 1999.
- [24] J. Zhou, DL Civco y JA Silander., "Un método de transformación de wavelet para fusionar datos pancromáticos Landsat TM y SPOT", *International Journal of Remote Sensing*, 19: 4, 743-757, 1998.
- [25] B. Khaleghi, Khamis, A. Karray, FO. Razavi, SN., "Fusión de datos multisensor: Una revisión del estado del arte". Universidad de Waterlook. y TTDD: Difusión de datos de dos niveles en redes de sensores inalámbricos a gran escala", *Wireless Netw* 11, 161-175, 2005.
- [26] B. Khaleghi y Karray, F., "Distributed random set theoretic soft-hard data fusion: Target tracking application. Intelligent Sensors", *Seventh International Conference on Sensor Networks and Information Processing*. 455-460, Diciembre 2011.
- [27] L. Rouhiainen., "Inteligencia Artificial - 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro", Editorial Alienta, 2018.
- [28] L. Lobete, Parra R., "Estimación de la tasa de pobreza en Cantabria mediante Matching Estadístico", Instituto cántabro de Estadística, 2018.
- [29] Y. Liu, Chen X, Wang Z, Wang ZJ, Ward RK, Wang X., "Deep learning for pixel-level image fusion: recent advances and future prospects", *Inf Fus* 1(42):158-173, 2018.
- [30] J. López, "Integración y fusión Multisensorial en Robots móviles autónomos", Universidad Complutense de Madrid, España, 2003.
- [31] J. Muñoz, Molero G., Benítez E. "Método de fusión de datos de fuentes heterogeneas para mantener la consistencia en los datos", Universidad Veracruzana, 2017.
- [32] G. Muhammad & Shamim, M., "COVID-19 and non-COVID-19 classification using multi-layers fusion from lung ultrasound images", *Information Fusion*, 72, 80-88, 2021.
- [33] E. Nakamura, Loureiro, AAF., Frery, CA., "Fusión de Información para redes de sensores inalámbricos: Métodos, modelos y clasificaciones." Universidad Federal de minas Gerais, 2007.
- [34] F. Nobis, Geisslinger, M., Weber, M., Betz, J., & Lienkamp, M., "A deep learning-based radar and camera sensor fusion architecture for object detection", *Symposium on Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Appli.*, 2019.
- [35] I. Pires, García, NM., Pombo, N., Flórez, F., "Desde la adquisición de datos hasta la fusión de datos: Una revisión exhaustiva y una hoja de ruta para la identificación de actividades de la vida diaria utilizando dispositivos móviles." Universidad de Beira. Portugal, 2016.
- [36] F. Rottensteiner, Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., "Detección de edificios mediante fusión de datos de escáner láser en el aire e imágenes multiespectrales: evaluación del rendimiento y análisis de sensibilidad." Universidad de Melbourne, 2007.
- [37] D. Rothenberg, "Data fusion enables: Nextgeneration smart mobile applications", *Electronic Design*, 2013
- [38] A. Ross and Jain, A., "Fusión de información en biometría" *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, Vol. 1, No. 2, junio de 2006.
- [39] G. Rodríguez, Gomez J.L, Barranco A.I., Martínez S., Sandoval J., "Reconocimiento y localización visual 3D de objetos para robots manipuladores", Instituto Tecnológico de la Paz, 2013.
- [40] S. Satorres, Ortega, C., Gámez, J., & Gómez, J., "Quality inspection of machined metal parts using an image fusion technique" *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 111, 374-383, 2017.
- [41] O. Schumann, Hahn, M., Dickmann, J., & Wöhler, C., "Semantic segmentation on radar point clouds", *21st International Conference on Information Fusion*, 2179-2186, 2018.
- [42] G. Shon, Dowman, Y., "La fusión de datos de imágenes satelitales de alta resolución y Datos LiDAR para extracción automática de edificios" Universidad de Londres. 2007.
- [43] J. Steinbaeck, Steger, C., Holweg, G., & Druml, N., "Next generation radar sensors in automotive sensor fusion systems" *Symposium on Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications*, December 1-6, 2017.
- [44] C. Serrano, "Fusión de Conocimiento en bases de datos relacionales" Universidad de Granada, 2003.
- [45] J. Sun, Fujita, H., Zheng, Y., & Ai, W., "Multi-class financial distress prediction based on support vector machines integrated with the decomposition and fusion methods", *Information Sciences*, 559, 153-170, 2021.
- [46] F. Villada F., Muñoz N., García E., "Aplicaciones de las redes Neuronales al pronóstico de precios en el mercado de valores". Universidad de Antioquia, 2012.

- [47] L. Wald, Rachin T., Mangolini, M., "Fusión de Imágenes Satelitales de diferentes resoluciones espaciales: evaluación de la calidad de las imágenes resultantes". *Revista de Ingeniería Fotogramétrica y teledetección*. Vol. 63, No. 6 pp. 691-699, 1997.
- [48] H. Xiaolin; Jing, Y.; Jiqiang, L.; Weidong, S., "Hyperspectral and Multispectral Image Fusion Using Cluster-Based Multi-Branch BP Neural Networks", Institute for Artificial Intelligence, Beijing, China, 2019.
- [49] C. Xydeas and Petrovic, V., "Medida de Rendimiento de Imagen Objetiva" en *Electronics Letters*, vol. 36, no. 4, pp. 308-309, 2000.
- [50] Z. Chair y PK Varshney, "Fusión óptima de datos en sistemas de detección de sensores múltiples", en *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-22, no. 1, pp. 98-101, 1986.
- [51] J. Zhang, "Teledetección de multiples fuentes la fusion de datos: estados y tendencias", *Revista Internacional de Imagen y fusión de datos*, Vol. 1, No. 1, pp. 5-24, 2010.

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
Vol. II, sexta edición

El contenido de este libro trata sobre una ingeniería global y sostenible que guíe a la sociedad en su tránsito por el Nuevo Orden Mundial. Los autores de cada capítulo plasman sus pensamientos acerca de muchas de estas cuestiones, tan necesarias en la actual situación del Planeta, ofreciendo una perspectiva global de la ingeniería para el mundo, y no para atender al neoliberalismo imperial. Las investigaciones desde las que se generan los capítulos aquí incluidos son de carácter transdisciplinar, ya que esta deberá la manera en que se desarrolle la ingeniería en la Nueva Era que estamos viviendo.

