



Editorial  
IAI

# DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Tercera Edición

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

Medellín - Antioquia  
2018

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

# Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Tercera Edición

ISBN: 978-958-59127-9-3

© 2018 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



**Editorial IAI**

Serna, M.E. (Ed.)  
Desarrollo e Innovación en Ingeniería -- 3a Edición  
Medellín, Antioquia  
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2018  
pp. 460. Investigación Científica  
ISBN: 978-958-59127-9-3

Desarrollo e Innovación en Ingeniería  
Serie: Ingeniería y Ciencia  
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Tercera Edición: agosto 2018  
ISBN: 978-958-59127-9-3  
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2018 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/).

Edición general: Instituto Antioqueño de Investigación IAI  
Diseño: IAI, Medellín, Antioquia.  
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas 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, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación  
Instituto Antioqueño de Investigación IAI  
<http://fundacioniai.org>  
*contacto(AT)fundacioniai.org*

© 2018 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación  
Medellín, Antioquia

## Prólogo

Presentamos a la comunidad la tercera edición del texto desarrollo e innovación en Ingeniería, un libro que es producto del trabajo investigativo de una serie de autores que, con esfuerzo y trabajo mancomunado, aportaron los capítulos que contiene esta edición. En cada uno de ellos se observa una labor estructurada y regida por los lineamientos propios del quehacer científico en Ingeniería.

En esta ocasión se presentan trabajos en Ciencias Computacionales, Procesos Formativos en Ingeniería y en las ingenierías Industrial, Electrónica, Mecánica, Química, Ambiental, Aeroespacial y Civil; todos enmarcados en trabajos de investigación y pensados para difundir los resultados a un amplio espectro de la comunidad internacional. Cada capítulo refleja la seriedad de la labor de sus autores y el encomio propio de investigadores que buscan aportar al cuerpo de conocimiento de cada una de estas disciplinas.

El lector notará que el contenido del libro se presenta en orden disciplinar para una mejor lectura y comprensión de los resultados que se ofrecen desde cada una de estas áreas del conocimiento. De la misma manera, se resalta el hecho de que cada capítulo ofrece su aporte al objetivo del texto, es decir, al desarrollo y la innovación en ingeniería. De esta manera la Editorial Instituto Antioqueño de Investigación cumple con su razón y labor social de divulgar y masificar la ciencia, para ayudarle a la comunidad a ampliar su conocimiento, y para darle continuidad a las distintas investigaciones que se describen en el libro.

Esperamos que sea del agrado de todos y que cada autor pueda utilizar su publicación para difundirla, citarla y ampliarla en la medida de sus posibilidades y recursos. Asimismo, instamos a las instituciones que patrocinaron estos trabajos para que les den la continuidad que se merecen y para que la comunidad pueda disfrutar de una mayor fuente de información y conocimiento, a la vez que se amplía el cuerpo de conocimiento de cada una de las disciplinas referenciadas.

## Contenido

Análisis dinámico de la aeronave Aquila en la condición de vuelo ascenso sostenido <i>Jesús D. Blanco G., Luz Á. Ibarra L. y Pedro L. Jiménez S.</i>	7
Manufactura aditiva para el análisis de propiedades mecánicas de morfologías naturales <i>Giovanni Barrera T., Erika Imbeth Solange y Luisa M. Hernández</i>	19
Modelación de la calidad de agua del río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro, Valle del Cauca, mediante el modelo dinámico QUAL2Kw <i>Stephanie Lugo R. y Javier E. Holguín G.</i>	27
Propuesta de modelo de seguimiento y control basado en PMBOK para la gerencia de proyectos SCRUM <i>Marisella Restrepo P. y Adriana Xiomara R.</i>	38
Impacto de Twitter en el big data y data mining <i>Roberto C. Guevara C. y Yolfaris N. Fuertes A.</i>	49
Una aproximación a un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software <i>Adriana Maulini, Luciano Straccia y María F. Pollo C.</i>	56
Enriquecimientos pictóricos y conceptuales sobre modelos de bodegas de datos <i>Andrés F. Cadavid A., Francisco J. Moreno A. y Jaime Guzmán L.</i>	64
Estudio de usos y riesgos asociados a las redes abiertas bajo el protocolo IEEE 802.11 en la ciudad de Bogotá <i>Francisco C. Valle D.</i>	73
Tecnologías emergentes que apoyan el trabajo colaborativo en SCRUM <i>Gloria Y. Tobón C., Mónica M. Rojas R. y Adriana X. Reyes G.</i>	81
Desarrollo de Software para Análisis Estructural con Elementos Tipo Barra en 3D Utilizando MATLAB <i>Mauricio Paz G., José M. Villegas y Allen Castillo</i>	88
Recolección de información mediante gamificación y videojuegos que contribuyan al análisis de cómo se resuelven problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos e ingenieros en la industria <i>Pablo E. Góngora T. y Fernando Martínez R.</i>	97
Ingeniería de Requisitos para la construcción de software de Realidad Virtual inmersiva RV aplicando el diseño universal <i>Martha Y. Segura R., Ricardo A. Fonseca y Juan D. Correa G.</i>	105
Propuesta de indicadores para medir el estado de la calidad interna de las aplicaciones de escritorio, desarrolladas como proyectos de grado en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica aplicando la norma ISO/IEC 25000 <i>Katerine Beleño C., Ronald Palencia y Miguel A. Rincón P.</i>	112
Propuesta de una arquitectura distribuida para un sistema de análisis inteligente de sentimientos: Una aplicación del marco de trabajo TOGAF® <i>Julio Martínez Z., Jorge Giraldo P. y Sandra Mateus S.</i>	120
Estudio comparativo de métodos de evaluación de usabilidad para sitios web <i>Sandra M. Hurtado G., Jessica Pimentel C. y Gabriel E. Chanchí G.</i>	129
Efecto de la corrosión del acero en la durabilidad del concreto reforzado <i>Miguel Á. Ospina G., Carlos Andrés Gaviria y Ricardo A. Castro S.</i>	137
Propuesta de modelamiento numérico de muros delgados de concreto reforzado diseñados para zona de amenaza sísmica alta <i>Erica L. Arango, William Valencia M. y Álvaro Viviescas</i>	143
Los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial: Una revisión actual <i>Jherson J. Bohórquez, Nel S. Oviedo y Guillermo Mejía</i>	152
Gestión Integral del Riesgo Sísmico en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente <i>Oscar F. Rosas C.</i>	159
BIM, un paso en lo académico. Reflexión sobre la implementación de la metodología en el programa de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia <i>Zully A. Palomeque S., Isabel C. Cerón V. y Scherazada Calderón V.</i>	167
Sistema de reconocimiento de maduración del tomate, mediante el procesamiento de imágenes con OpenCV y Python en una Raspberry Pi 3 B <i>Ángel A. Rodríguez A., John A. Figueredo L. y Juan A. Chica G.</i>	174
Evaluación de equipos electro-electrónicos desarrollados en Colombia con respecto al cumplimiento de la normatividad internacional para certificación de productos <i>André Laverde y Arley Delgado</i>	182
Masificación de mediciones y acceso a datos de telemetría sobre calidad del aire, para toma de decisiones en ciudades inteligentes <i>Carlos Gómez, Guillermo Valencia y Valeria Fonseca</i>	190
Estudio de uso del espectro radioeléctrico por parte de las estaciones de televisión digital terrestre colombiana, como paso para la cuantificación de los espacios en blanco TVWS <i>Carlos Gómez, Winston Barrios y Claudia Chacón</i>	198
Análisis de metodologías de modelado y simulación para sistemas de telecomunicaciones <i>Claudia M. Hernández, Víctor F. Miramá y Virginia Solarte</i>	206
Sistemas de alertas tempranas en Colombia orientadas a la reducción del riesgo ante crecientes y crecientes súbitas: Diagnóstico y propuesta de intervención bajo Internet de las Cosas(IoT) <i>Ernesto Neira y Robinson Castillo</i>	216
Aplicabilidad en el territorio colombiano de los modelos de la UIT para cálculo de pérdidas de propagación debidas al clutter <i>Félix Gómez, Guillermo Valencia y Edgar Rodriguez</i>	225

Control de humedad relativa en invernadero agrícola mediante el autoajuste difuso controladores PI <i>Rafael A. Núñez, Carlos L. Corzo y Andrea C. González</i>	236
Sistema de comunicaciones con codificación convolucional basado en USRP <i>Víctor Miramá, Claudia Hernández y Pablo Jojoa</i>	246
Diseño y Simulación de Arreglos de Antena en la Frecuencia de 72 GHz (Banda - E) para empleo en Redes Móviles 5G <i>Javier E. Arévalo P. y Ricardo A. González B.</i>	255
Identificación de la señal de falta de control en un proceso de manufactura mediante redes neuronales haciendo uso de un gráfico de control MEWMA. <i>Gerardo Avendano, Gustavo Campos A. y Omar Alonso Patiño</i>	264
Revisión de la literatura de prácticas para evaluar la calidad del servicio en instituciones de salud: Hacia un enfoque de Lean Healthcare <i>Ivanhoe Rozo R., Lizeth F. Serrano C. y Flor N. Díaz P.</i>	270
Metodología para el análisis en Distribución Urbana de Mercancías <i>Leila N. Ramírez C. y Alexander Parody</i>	278
Prácticas de referencia de Laboratorios de Innovación: Una revisión sistemática de literatura en la última década <i>Evely D. Hernández M., María C. Ferreira M. y Lizeth Serrano C.</i>	286
Incidencia de la estrategia de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida <i>María del C. Pérez O., Elsa B. Gutiérrez N. y Marianela Luzardo B.</i>	293
Influencia de los sistemas normalizados de gestión en el logro de una ventaja competitiva sostenida <i>Elsa B. Gutiérrez N., María del C. Pérez O. y Marianela Luzardo B.</i>	305
Prácticas de referencia para la transferencia de conocimiento en instituciones de educación superior: Una Revisión Sistemática de Literatura <i>Carlos Guerra C., María Orjuela S. y Lizeth Serrano C.</i>	316
Directriz de mejoramiento del proceso de envasado en la Industria Licorera del Cauca basado en el Mantenimiento Productivo Total (TPM) <i>Nora F. Arciniegas S., Juan M. Segura M. y Jaime H. Mendoza C.</i>	325
Propuesta de un rotor Savonius con uso de CFD para zonas remotas en Colombia <i>Iván Mauricio Ostos R., Iván Darío Ruiz H. y Carlos Andrés Collazos M.</i>	335
Estudio computacional de ondas en la interfaz gas-líquido en flujo anular <i>Adriana Bonilla, Iván Ruiz y Iván Ostos</i>	348
Caracterización de esponjas de sericina de seda <i>María C. Arango, Adriana Restrepo O. y Catalina Álvarez L.</i>	356
Situación actual de la manufactura de fundiciones grises en el norte del Perú. Identificación de problemas y propuestas de mejora. <i>Rosalba Guerrero A., Jorge Iván Gómez G. y Oscar J. Restrepo B.</i>	365
Efecto de la fragilización por hidrógeno gaseoso sobre las propiedades mecánicas de un acero microaleado tratado térmicamente <i>Julio C. Villalobos, Sergio Serna y Bernardo Campillo</i>	373
Análisis de las propiedades mecánicas y metalográfica de las varillas de acero corrugadas comercializadas por las diferentes ferreterías bajo la norma ASTM (A706/706m, A615/A615m) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander <i>José H. Arévalo R. y Jhon Arévalo T.</i>	381
Análisis de la investigación, desarrollo e innovación en Colombia desde una perspectiva compleja <i>Vanessa P. Pertuz P. y Adith B. Pérez O.</i>	390
Desarrollo del pensamiento computacional en mentes jóvenes <i>Lauren Y. Gómez Q.</i>	401
Proyecto Integrador Corporación Universitaria Remington PICUR: Una estrategia innovadora para la formación de Ingenieros para el siglo XXI <i>Piedad M. Metaute P., Giovanni A. Flórez O. y Mónica M. Córdoba C.</i>	407
Descripción de una metodología de evaluación por competencias en programas de Ingeniería: caso aplicado a la Corporación Universitaria Americana – Sede Medellín <i>David A. García A., César F. Henao V. y Gustavo A. Araque G.</i>	417
Relación entre TIC, TAC y TEP y el aprendizaje colaborativo en Instituciones de Educación Superior: Estudio de caso para programas de Ingeniería de Sistemas <i>Gustavo A. Araque G., David A. García A. y César F. Henao V.</i>	423
Desarrollo de un laboratorio virtual para el proceso de producción de microalgas: Caso spirulina platensis <i>Kainer D. Nassif A., Mauricio A. Villalba y Hugo F. Lobaton</i>	431
Determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de la aleación Al-14%Cu mediante un método alternativo de análisis térmico asistido por computador <i>Carlos González R., Carla Aguilar M. y Anthony A. Harrup G.</i>	437
Efecto de los nanotubos de carbono en la pirólisis térmica y catalítica de polietileno de alta densidad <i>Omar D. Gutierrez y Nancy Montes V.</i>	446

# Análisis dinámico de la aeronave Aquila en la condición de vuelo ascenso sostenido

Jesús D. Blanco G.<sup>1</sup>

Luz Á. Ibarra L.<sup>2</sup>

Pedro L. Jiménez S.<sup>3</sup>

Universidad de San Buenaventura  
Bogotá – Colombia

El uso de aeronaves no tripuladas para distintas aplicaciones ha tenido auge en los últimos años, numerosas aplicaciones han surgido gracias a la practicidad y tamaño de los mismos. Se clasifican en dos grandes grupos, de ala fija y de ala rotatoria. Aquila es una aeronave de ala fija basada en el modelo comercial de la aeronave Sky Swallow, cuya configuración de empenaje es tipo “V”, como parte del proceso investigativo, se utilizó una configuración poco convencional para determinar si la aeronave es dinámicamente estable en la condición de vuelo ascenso sostenido. En proceso de desarrollo se realizó el modelamiento geométrico de la aeronave en un software de diseño asistido CAD, posteriormente se analizaron parámetros de rendimiento de la aeronave y finalmente, con la ayuda de XFRL-5 se hizo un análisis dinámico de la aeronave. Se logró determinar que la aeronave es dinámicamente estable en la condición de análisis, se espera que para futuras investigaciones se realice un análisis más detallado utilizando datos comparativos obtenidos en vuelo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de aeronaves no tripuladas ha cobrado fuerza en los últimos años, numerosas aplicaciones en el sector industrial han ido surgiendo a través de los años, teniendo en cuenta las necesidades del sector económico. Una de sus aplicaciones actuales es la fotografía aérea utilizando cámaras multiespectrales, para hacer control de cultivos transitorios y análisis ganadero ganado en zonas de gran extensión, otra de sus aplicaciones es la medición de contaminantes atmosféricos, tarea que se ha ido implementado, debido a las grandes emisiones contaminantes en los últimos años. En el campo investigativo es de gran importancia buscar alternativas eficientes para el uso de este tipo de aeronaves, de forma que las misiones que desempeñen sean lo más eficientes y posibles desde el punto de vista aerodinámico, que su rendimiento sea óptimo y que dinámicamente cumplan con las condiciones de estabilidad y control.

La aeronave Aquila (Figura 1.) es una aeronave de ala fija, empenaje en “V” y motor eléctrico de 215 rev/voltio, la aeronave está diseñada en fibra de carbono, fibra de vidrio y madera tipo balsa, siguiendo el modelo de la aeronave Sky Swallow. Con su configuración aerodinámica, puede volar de forma manual y automática. El motor es un brushless de 1900 vatios y obtiene la energía de tres baterías LiPo de 10 celdas (41.6v). La aeronave contiene una sección de carga paga removible (parte baja del fuselaje), lo cual permite configurar la sección de carga según el tipo de misión.



Figura 1. Aeronave Aquila

De esta aeronave se valida su condición de estabilidad estática longitudinal en la condición de vuelo ascenso sostenido, sin embargo, para el análisis de esta condición dinámica se encuentran valores de rendimiento en todas las etapas de vuelo y específicamente en la condición de ascenso, posteriormente se realizan vuelos experimentales que permiten la adquisición de datos de telemetría para el análisis y comparación de datos teóricos y experimentales. El rendimiento de vuelo permite evaluar el comportamiento de la aeronave en las diferentes fases de vuelo, sin embargo, la condición más importante es la condición de ascenso y despegue en función de sus características geométricas y de las condiciones atmosféricas predeterminadas. Este estudio pretende analizar dinámicamente la aeronave Aquila en la condición de vuelo ascenso sostenido para determinar si esta aeronave es apta o no para desarrollar mediciones de contaminantes atmosféricos en columna de aire vertical, teniendo en cuenta su disposición geométrica y sus características dinámicas de estabilidad y control.

<sup>1</sup> [jdblancog@academia.usbbog.edu.co](mailto:jdblancog@academia.usbbog.edu.co)

<sup>2</sup> [libarra@academia.usbbog.edu.co](mailto:libarra@academia.usbbog.edu.co)

<sup>3</sup> [pjimenez@usbbog.edu.co](mailto:pjimenez@usbbog.edu.co)

El análisis de las condiciones dinámicas resulta de gran importancia en el estudio, debido a que se puede determinar y caracterizar las fuerzas aerodinámicas y de propulsión, los momentos y fuerzas que se generan en la aeronave para analizar la respuesta en el tiempo. La estabilidad puede ser estática y dinámica, sin embargo, el objeto de estudio es analizar la estabilidad estática en el eje longitudinal. La estabilidad estática se puede analizar en los ejes longitudinal, lateral y direccional, en la estabilidad longitudinal es importante analizar las contribuciones que tendrán distintos componentes como lo son el ala, fuselaje empenaje y su respectiva localización del centro de gravedad para localizar la carga paga. La aeronave tiene un peso máximo de despegue de 9kgf, parámetro base para el análisis de rendimiento y de dinámica de vuelo, una disposición adecuada de peso y balance influye significativamente en el análisis de estabilidad volviendo inestable o estable la aeronave dependiendo la disposición del centro de gravedad y con esto, se puede analizar cuál es la mejor disposición de peso y balance para que la aeronave sea dinámicamente estable.

## 2. MÉTODO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para el estudio de los parámetros dinámicos de la aeronave "Aquila" se llevaron a cabo tres etapas. En primer lugar, se realizó la parte de modelamiento geométrico del avión, teniendo en cuenta que la aeronave actualmente ya está construida pero no presenta ninguna clase de dato técnico o planos que permita realizar un estudio más profundo de su comportamiento en vuelo, se hizo el levantamiento dimensional para obtener los parámetros que cumplan con el objetivo del estudio. En segunda instancia, partiendo del modelamiento geométrico se realizan los cálculos teóricos de rendimiento y dinámica de vuelo del vehículo aéreo, los cuales bajo ciertas variables, van a indicar el comportamiento en vuelo teniendo en cuenta la condición de Ascenso Sostenido, que es la base del estudio y que podría ser implementada en distintas aplicaciones futuras. La última etapa del proyecto es la fase experimental, que comprende desde la puesta a punto de la aeronave para cumplir los patrones de vuelo ya establecidos hasta los vuelos experimentales y toma de datos para compararlos con las variables calculadas de manera teórica y determinar el porcentaje de error o la desviación generada del modelo teórico al modelo real.

### 2.1 Modelamiento Geométrico de la Aeronave

Para el modelamiento geométrico del vehículo aéreo se subdividió en 2 etapas; la primera, el levantamiento geométrico que corresponde a la medición dimensional de todos los componentes del avión desde secciones de fuselaje, estabilizador y trenes hasta componentes pequeños como tapas de inspección. Para este procedimiento se realizó una división de piezas asignando un Parte Numero (P/N) a cada sección y asignando un nombre específico que pueda ser fácilmente identificado en planos de ingeniería, o en una posterior manufactura. En la segunda etapa, se utilizó un software de diseño asistido por computadora CATIA, se tomó como base cada uno de los componentes que conforman la aeronave Aquila con sus respectivas mediciones anteriormente realizadas que se modelaron y posteriormente se realizó el ensamble de cada componente para dar forma al avión.

**Tabla 1.** Datos geométricos de la Aeronave Aquila

Parámetro	Símbolo	Valor	Unid.
<b>Fuselaje</b>			
Longitud Total	$l_{fT}$	1,57	m
Longitud (Sin Tail-boom)	$l_f$	1,10	m
Diámetro Máximo	$d_f$	0,22	m
Área Húmeda	$S_{f_{wet}}$	0,354	m <sup>2</sup>
<b>Ala (Perfil NACA 4412)</b>			
Envergadura	$b$	2,64	m
Cuerda en la Punta	$c_t$	0,267	m
Cuerda en la Raíz	$c_r$	0,38	m
Cuerda Media Aerodinámica	$\bar{c}$	0,327	m
Flechamiento en el L.E.	$\Lambda_{LE}$	3,6	deg.
Área Proyectada	$S$	0,867	m <sup>2</sup>
Relación de Aspecto	$AR$	8,26	-
Ángulo de Incidencia	$i_w$	1	deg.
<b>Estabilizador Horizontal (Perfil NACA 0012)</b>			
Envergadura	$b_H$	0,751	m
Cuerda en la Punta	$c_{tH}$	0,222	m
Cuerda en la Raíz	$c_{rH}$	0,125	m
Cuerda Media Aerodinámica	$\bar{c}_H$	0,173	m
Flechamiento en el L.E.	$\Lambda_{LE}$	30	deg.
<b>Estabilizador Vertical (Perfil NACA 0010)</b>			
Longitud	$b_V$	0,183	m
Cuerda en la Punta	$c_{tV}$	0,187	m
Cuerda en la Raíz	$c_{rV}$	0,088	m
Cuerda Media Aerodinámica	$\bar{c}_V$	0,137	m
Flechamiento en el L.E.	$\Lambda_{LE}$	40	deg.

Una vez realizado el levantamiento dimensional, se compila la información de las medidas principales de la aeronave que son parámetros necesarios para los cálculos de dinámica de vuelo, rendimiento y aerodinámicos. Todos estos valores presentados en la tabla XX son tomados posteriormente a la medición de la aeronave real y sacando su



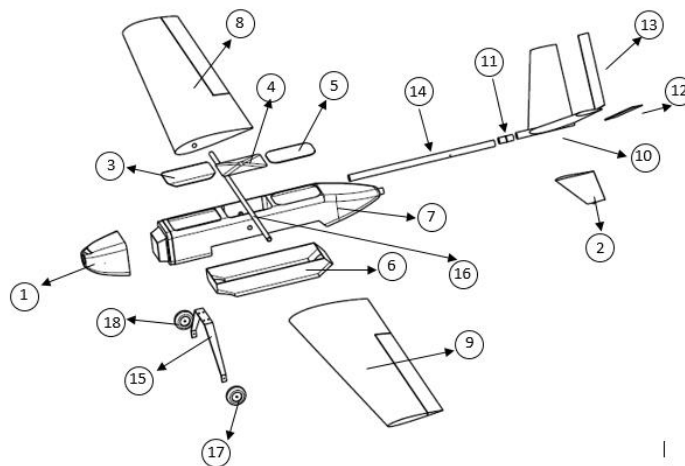
promedio después de la toma de 3 datos. Estas longitudes, ángulos y dimensiones hacen parte de la etapa posterior en el que se modela el avión en un software de diseño asistido por computador (Tabla 1).

### 2.1.1 Análisis y Levantamiento dimensional

En primer lugar, para el análisis geométrico fue necesario caracterizar cada pieza individualmente, realizando mediciones y clasificando cada componente adecuadamente. El resultado fue un total de 18 elementos (Tabla 2), se asignó un parte número específico para realizar los planos de ingeniería (Figura 2). Para el análisis geométrico, las secciones se clasificaron por grado de complejidad y una vez realizado este análisis se caracterizaron por mediciones de dimensiones básicas con un pie de rey digital para disminuir el porcentaje de error presentado con otros elementos de medición y se tomaron un total de 3 mediciones por unidad de longitud medida. De esta forma y agregando un promedio estadístico, se obtiene una geometría más exacta y aproximada a la realidad.

**Tabla 2.** Clasificación de Componentes de la Aeronave Aquila

Ítem	P/N	Elemento
1	AQ001	Carenado del Motor
2	AQ002	Patín de Cola
3	AQ003	Tapa Inspección Fuselaje Delantera
4	AQ004	Tapa Inspección Fuselaje Central
5	AQ005	Tapa Inspección Fuselaje Trasera
6	AQ006	Sección de Carga
7	AQ007	Fuselaje
8	AQ008	Ala Derecha+ Alerón
9	AQ009	Ala Izquierda+ Alerón
10	AQ010	Empenaje
11	AQ011	Junta Tubo Empenaje con Fuselaje
12	AQ012	Elevón Izquierdo
13	AQ013	Elevón Derecho
14	AQ014	Tubo Unión Fuselaje-Empenaje
15	AQ015	Tren Principal
16	AQ016	Viga Principal Alas
17	AQ017	Rueda Tren Der.
18	AQ018	Rueda Tren Izq.



**Figura 2.** Diagrama de partes aeronave Aquila

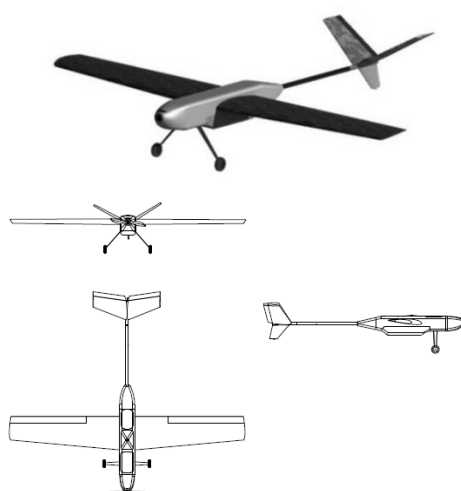
Una vez clasificadas las piezas de la aeronave con su respectivo P/N, se realiza una medición del peso de cada componente. Este parámetro resulta influyente en el cálculo de estabilidad, ya que afecta la inercia del sistema en general a la hora de generar un cálculo de dinámica de vuelo. Para este procedimiento se usó una báscula digital y por el procedimiento anteriormente mencionado de la toma de 3 mediciones se obtuvo un peso estadístico promedio que es el que se tendrá en cuenta para el estudio a lo largo del proyecto (Tabla 3).

### 2.1.2 Desarrollo y modelamiento geométrico

Posterior al levantamiento dimensional de cada una de las secciones de la aeronave se realiza el diseño computacional de la geometría teniendo en cuenta las mediciones tomadas en la etapa anterior. Cada sección o pieza fue construida individualmente haciendo uso de los módulos de parte del software CATIA, clasificando su diseño. Posteriormente al modelamiento computacional se le asigna la densidad correspondiente para obtener el peso de las mediciones anteriores y finalmente se realiza el ensamble de cada componente hasta obtener el modelo de la aeronave computacional con cada una de sus secciones, sub-secciones y finalmente la aeronave completamente creada. Para la realización del ensamble de la aeronave se usó el módulo (Assembly Design) del software computacional CATIA (Figura 3), en el cual, mediante la asignación de restricciones de contacto, se restringen y se ubican las piezas de acuerdo a la aeronave real generando un modelo digital muy aproximado a real.

**Tabla 3.** Medición Pesos de los componentes de la Aeronave Aquila

Ítem	P/N	Elemento	Medición Característica	Mediciones (gr)			Promedio (gr)
				Med1	Med 2	Med 3	
1	AQ001	Carenado Motor	Peso	140.2	140.2	139.8	140.07
2	AQ002	Patín de Cola	Peso	29.8	29.8	30.4	30.00
3	AQ003	Tapa Inspección Fuselaje Delantera	Peso	50	50.2	50	50.07
4	AQ004	Tapa Inspección Fuselaje Central	Peso	49.8	49.9	50.3	50.00
5	AQ005	Tapa Inspección Fuselaje Trasera	Peso	40.1	40.0	40.0	40.03
6	AQ006	Sección de Carga	Peso	299.9	300.3	300.0	300.07
7	AQ007	Fuselaje	Peso	1140.1	1140.1	1140.0	1140.07
8	AQ008	Ala Derecha+ Alerón	Peso	569.9	570.0	570.2	570.03
9	AQ009	Ala Izquierda+ Alerón	Peso	579.7	580.2	580.1	580.00
10	AQ010	Empenaje	Peso	190.0	190.1	190.1	190.07
11	AQ011	Junta Tubo Empenaje con Fuselaje	Peso	19.9	20.0	20.0	19.97
12	AQ012	Elevón Izquierdo	Peso	30.0	30.0	30.0	30.00
13	AQ013	Elevón Derecho	Peso	30.1	30.0	30.1	30.05
14	AQ014	Tubo Unión Fuselaje-Empenaje	Peso	110.2	110.1	109.7	110.00
15	AQ015	Tren Principal	Peso	150.0	150.1	150.2	150.10
16	AQ016	Viga Principal Alas	Peso	129.9	130.0	130.0	129.97
17	AQ017	Rueda Tren Der.	Peso	29.8	29.8	30.0	29.87
18	AQ018	Rueda Tren Izq.	Peso	31.0	29.8	29.8	30.20

**Figura 3.** CAD isométrico y Vistas Generales de la aeronave

### 3. RENDIMIENTO DE LA AERONAVE

Para el análisis de rendimiento es necesario considerar algunos parámetros aerodinámicos que resultan de gran importancia para el desarrollo de la misión, por ejemplo, es necesario que la aeronave además de producir sustentación contrarreste la fuerza de resistencia al avance producida por la corriente de aire. Adicionalmente, es importante analizar cuál es la relación empuje peso en función de la velocidad de pérdida, para graficar el diagrama de restricciones, conocer las características de despegue, ascenso, vuelo recto y nivelado, aterrizaje, en función de las condiciones atmosféricas y la altura de vuelo [1]

#### 3.1 Características geométricas de la aeronave

Para el análisis de rendimiento es necesario conocer las características geométricas de la aeronave (Tabla 4), estas características serán de gran importancia para determinar algunos parámetros, algunos de estos se obtienen teniendo en cuenta la ficha técnica de la aeronave y realizando algunas mediciones de forma manual.

**Tabla 4.** Características generales de la aeronave

Parámetro	Valor	Unidades
Longitud del fuselaje	1.97	m
Envergadura	2.645	m
Superficie alar	0.825	m <sup>2</sup>
Cuerda en la raíz	0.38	m
Cuerda en la punta	0.266	m
Cuerda media aerodinámica	0.325	m
Carga alar	107.02	N/m <sup>2</sup>
Relación de aspecto	8.5	-
Peso vacío	3300	gr
	32.37	N
Peso máximo de despegue	9000	gr
	88.29	N

Teniendo en cuenta las características de geométricas y de diseño mencionadas en la Tabla 3, se realizan todos los cálculos teóricos, con la configuración de peso máximo para la que está diseñada.

### 3.2 Condiciones atmosféricas

Los vuelos experimentales de la aeronave no tripulada Aquila son realizados en el municipio de Tenjo, Cundinamarca en Colombia. El lugar de pruebas, con coordenadas 4°49'25,16"N y 74°09'22,17", cuenta con una pista de vuelo a una elevación de 2570 metros sobre el nivel del mar, la cual tiene un largo de 300 m y un ancho de 30 metros, suficiente para la operación de aeronaves remotamente controladas y no tripuladas de pequeñas dimensiones. La temperatura promedio de ese lugar se encuentra entre los 10°C y 15°C, con velocidad promedio del viento de 4 m/s. [1] (Tabla 5).

**Tabla 5.** Condiciones atmosféricas

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura	271.25	K
Altura de despegue	2570	M
Presión	74022.89	Pa
Densidad	0.95	Kg/m <sup>3</sup>

### 3.3 Autonomía

Este parámetro indica que tanto tiempo puede estar la aeronave en vuelo hasta agotar por completo toda su reserva energética. [3] La autonomía se determinó teniendo en cuenta el motor de la aeronave y el tipo y la cantidad de baterías que se van a usar. Después de realizar pruebas en el banco de pruebas se determinó que la aeronave tendrá una autonomía de 51 minutos, dada por el tipo de motor brushless Hacker A60- 16 M y las baterías de litio implementadas.

### 3.4 Carga paga

La aeronave Aquila tiene una sección de carga que pretende ser adaptada para la realización de diferentes misiones. La configuración actual tiene una sección de carga P/N AQ 006 (Ver Figura 2) que será utilizada según el tipo de misión, sin embargo, para los cálculos de rendimiento se asumió un valor de 1Kg.

### 3.5 Techo de servicio

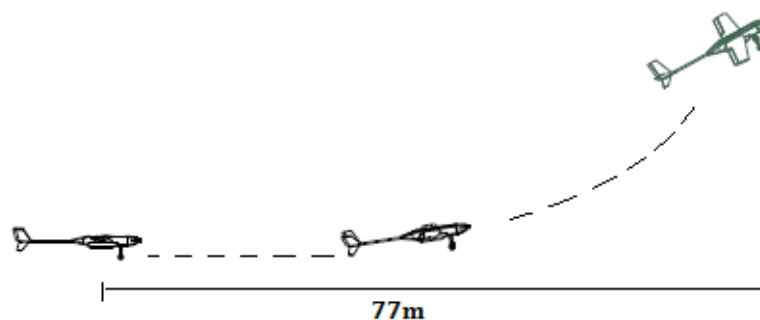
Como continuación a un proyecto de investigación de medición de contaminantes, se pretende que la aeronave sea, en primera instancia, capaz de medir contaminantes atmosféricos en columna de aire ascendente, por tanto, el techo de servicio será de 1Km que es la altura necesaria para medir contaminantes, cabe resaltar que el techo de servicio podrá variar según la misión estipulada. [2]

### 3.6 Rango

El rango es un parámetro que determina la distancia máxima de vuelo teniendo en cuenta las consideraciones de la planta motriz y del tipo de baterías empleada. Según la metodología seguida para rendimiento en motores eléctricos [3] se determinó un rango de 52Km para el tipo de motor y de baterías empleadas.

### 3.7 Distancia de despegue

La distancia de despegue es aquella en la que la aeronave deja por completo el suelo [4], utilizando algunas consideraciones aerodinámicas, se determinó que la distancia que se necesita para despegar en una pista de concreto seca es de 77m, este valor incluye la distancia de rodaje y la distancia de sobrepaso del obstáculo, este valor podría variar dependiendo las condiciones de la pista, como el tipo de césped y las propiedades atmosféricas instantáneas.



**Figura 4.** Distancia total de despegue aeronave Aquila

### 3.8 Velocidad de pérdida

La aeronave no podrá volar por debajo de la velocidad de pérdida, cuando se disminuye hay un incremento en el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación es el máximo y finalmente, disminuye abruptamente entrando en la región de desprendimiento de flujo [4]. La velocidad de pérdida para la aeronave Aquila es de 12,44 m/s.

### 3.9 Condiciones en ascenso

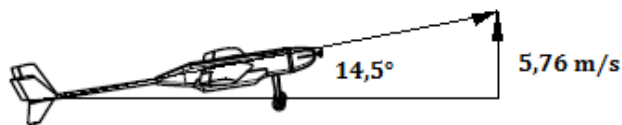
Debido a que el caso de estudio de investigación es en condición de ascenso, es importante resaltar las características en condición de ascenso. En la Tabla 6 se aprecian algunas características aerodinámicas y de rendimiento de la aeronave, junto con los parámetros en ascenso.

**Tabla 6.** Datos relevantes aeronave Aquila

Datos	Valor
CL máximo	1,46
L/D	30
Pendiente de CL vs delta del flap	0,0346
Masa al despegue (Kg)	9
Cuerda (m)	0,325
Swet/S	0,93
Altura de obstáculo según regulaciones (m)	15,24
Sg (m)	20,6
j	1,15
N (segundos)	1
$\mu$	0,3
Factor de carga máximo (n)	3,4
Velocidad de pérdida (m/s)	12,44
Velocidad de crucero (m/s)	17
Velocidad máxima (m/s)	30
Velocidad del giro sostenido (m/s)	25
Tasa de ascenso máxima estimada (m/s)	5,8
Ángulo de ascenso (grados)	7,44

#### 3.9.1 Tasa máxima de ascenso

La tasa máxima de ascenso resulta importante cuando se desea que la aeronave alcance cierta altitud en la mínima cantidad de tiempo, la velocidad horizontal, tiende a ser menor cuando se alcanza el máximo ángulo de ascenso y de igual forma va aumentando con respecto cuando el ángulo de ascenso disminuye. [4] La máxima tasa de ascenso corresponde al máximo exceso de potencia sobre el máximo peso de despegue, para la aeronave Aquila se determinó que la máxima tasa de ascenso es de 5,76 m/s a un ángulo de 14,5° (Figura 5).



**Figura 5.** Tasa máxima de ascenso

## 4. ADAPTACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LA AERONAVE

Como parte de la investigación se buscó una configuración geométrica diferente a las que se habían utilizado anteriormente, por esta razón, la selección del empenaje en "V". Por tanto, se seleccionó el Sky Swallow como la aeronave de estudio. El fuselaje de la aeronave está construido en fibra de vidrio, con una sección de carga del mismo material. Las alas y el empenaje están contruidos de madera tipo balsa, forrados de monokote para dar un acabado superficial liso y continuo que sea favorable con la aerodinámica y el peso de la aeronave. El Tail-boom y tren de aterrizaje principal están diseñados de fibra de carbono.

### 4.1 Caracterización del motor

Para la selección de la planta motriz de la aeronave Aquila se realiza una caracterización de dos tipos de motores brushless Hacker A60, en la prueba se sensaron parámetros como RPM's, Voltaje, Amperaje y empuje. Los tipos de motores que se utilizaron fue un Hacker A60 20S y un Hacker A60 16M, de igual forma se acoplaron dos tipos de hélices 16x12 y 19x12, para determinar la de mejores prestaciones para el desarrollo de la misión.

La prueba consiste en instalar el motor en la bancada del banco de pruebas, esta tiene un vatímetro que muestra el voltaje, amperaje y potencia, está conectado a un controlador de velocidad para motores sin escobillas de 12-42v, con las baterías seleccionadas. Se utiliza un tacómetro digital laser para medir RPM's del motor y un dinamómetro para medir el empuje. A través del radio de control se va regulando la potencia al 25%, 50% y 100%. Los resultados encontrados al realizar las pruebas se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Resultados caracterización del motor

Motor	Tipo de hélice	Voltaje @ 50%	Amperaje @ 50%	RPM @ 50%	Empuje @ 50%	mAh @ 50%
A 60 20S	16x12	24.06 V	11.12 A	4320	13 N	189
A60 20S	19x12	23.3 V	14 A	3962	18 N	231
A20 16M	16x12	23.17 V	7.7 A	3720	8.5 N	126
A20 16M	19x12	29.4 V	16.3 A	4536	23 N	249

La configuración seleccionada es la del motor Hacker A60 16M con hélice de paso 19x12, se selecciona esta configuración, debido a que basado en los resultados, se evidenció que tendría una autonomía mayor (51 minutos) y mayor empuje, teniendo en cuenta que el empuje requerido es de 26.5 N.

#### 4.2 Tipos de Baterías

La aeronave está equipada con 3 baterías LiPo. Dos de 5000mAh, serán conectadas en paralelo para obtener una configuración de 10000mAh @ 25v y la otra será de 10000 mAh @16.8v, esta estará conectada en serie a las dos baterías mencionadas anteriormente, formando una configuración final de 10 celdas, 10.000mAh y 41.8V.

### 5. ANÁLISIS DE LA MECÁNICA DE VUELO DE LA AERONAVE AQUILA

Para efectuar el análisis de todos los parámetros de rendimiento, estabilidad y control y dinámica de vuelo, es necesario conocer que el estudio se realiza tomando parámetros críticos que influirán en el comportamiento del avión en vuelo, por lo que se analiza primero parámetros aerodinámicos en 2-D para conocer constantes que serán usadas para los análisis subsiguientes,

#### 5.1 Análisis de los parámetros Aerodinámicos en 2-D

Teniendo en cuenta el levantamiento dimensional del vehículo aéreo y el modelamiento computacional, el perfil aerodinámico de alas y empenaje, se comparó con una base de datos de perfiles alares de la universidad de Illinois [5] determinando así el perfil aerodinámico de alas y empenaje que son requerimientos necesarios para el posterior análisis del Ala en 3-D y de variables de rendimiento, así como de análisis dinámico.

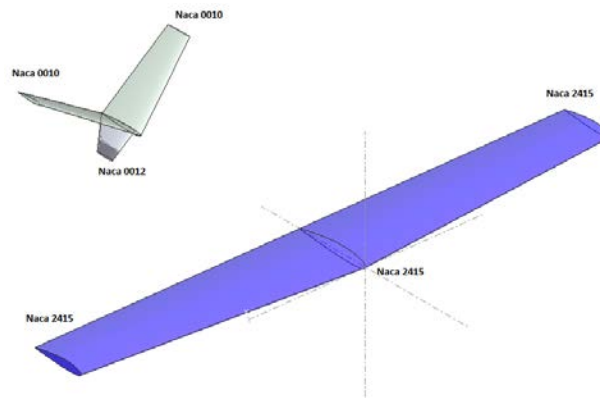
Para la determinación de los parámetros aerodinámicos, se realizó una simulación en el software XFLR5 del perfil aerodinámico NACA 2415 en 2-D del ala, que es el componente que va a brindar el mayor porcentaje de sustentación en el sistema. Se realizó un análisis teniendo en cuenta un número de Reynolds (Re) de 300000 que es la velocidad a la cual va a operar el avión en el ascenso sostenido, este cálculo se realiza con la finalidad de obtener los parámetros aerodinámicos del perfil que van a regir el modelo del ala en 3-D y de la aeronave en general, los cuales son determinantes en los cálculos teóricos de rendimiento de vuelo (Tabla 8).

**Tabla 8.** Parámetros aerodinámicos del perfil del ala en 3D

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Máximo Coeficiente de Sustentación	$C_{LMAX}$	1,33	-
	$\alpha_{C_{LMAX}}$	15.5	deg.
Etapa de Crucero	$C_L$	0,225    0,472	-
	$\alpha$	0            2	deg
Ángulo de Ataque @ $C_L = 0$	$\alpha_{C_L=0}$	-2.2	deg.
Pendiente de Sustentación	$dC_L/d\alpha$	0,0962	deg <sup>-1</sup>
Eficiencia aerodinámica Cl/Cd max @ 6 °	Cl/Cd	75.10	-

#### 5.2 Análisis de los parámetros Aerodinámicos de Ala y empenaje en 3-D

Una vez simulados cada uno de los perfiles que influirán directamente en la aeronave en XFLR-5 en 2-D, se realiza la geometría de la aeronave en el mismo software y teniendo los datos previos se realiza una simulación más aproximada del comportamiento aerodinámico de la aeronave en condiciones de vuelo variables. Para esta simulación se tienen en cuenta aspectos del levantamiento dimensional y se le asignan masas de cada sección ya que esto influye directamente sobre la estabilidad del modelo.



**Figura 6.** Modelamiento geométrico de ala y estabilizadores en XFLR-5

Se modela únicamente ala y los estabilizadores y se procede a simular la aeronave con un análisis polar Tipo 1 (Velocidad constante) a 17 m/s se usa el modelo teórico de Vortex Lattice Method (VLT) [6], que permite tener en cuenta condiciones viscosas del flujo sobre la aeronave, se le indica la inercia propia del avión, que equivale a la ubicación geométrica de sus componentes principales y se le asigna unos datos aerodinámicos desde una altura y una

temperatura en específico, en este caso desde las condiciones de operación de Bogotá (h=2600 m y Temp= 15°) un rango de ángulos de ataque que van desde -10 a 13 °. Para la realización de este modelamiento se obtiene el comportamiento aerodinámico de la aeronave teniendo en cuenta propiedades viscosas del flujo y la contribución de las superficies a las diferentes propiedades aerodinámicas que afectan el vuelo del Aquila (Tabla 9), se observa con respecto a los parámetros determinados anteriormente en el modelo 2-D la influencia de las características viscosas en la obtención de datos más acertados al patrón real.

**Tabla 9.** Propiedades aerodinámicas que afectan el vuelo del Aquila en condiciones viscosas

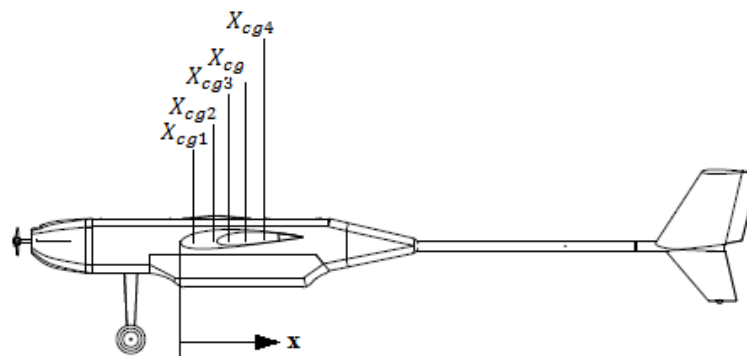
Datos	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo Coeficiente de Sustentación	$C_{LMAX}$	1,3	-
	$\alpha_{C_{LMAX}}$	13	deg.
Etapa de Crucero	$C_L$	0,163	0,345
	$\alpha$	0	2
Ángulo de Ataque @ $C_L = 0$	$\alpha_{C_L=0}$	-2	deg.
Pendiente de Sustentación	$dC_L/d\alpha$	0,0898	deg <sup>-1</sup>
Cl/Cd max @ 4 °	Cl/Cd	23.15	-
Cd min @ -1 °	$Cd_{min}$	0,0118	-



**Figura 7.** Ubicación de masas a lo largo de la aeronave

### 5.3 Diagrama de Trim de la Aeronave

Posterior a la determinación de los parámetros Aerodinámicos, se hace una aproximación a la parte de estabilidad de la aeronave haciendo uso del diagrama de Trim, un gráfico que relaciona la ubicación del centro de gravedad respecto a la cuerda del perfil y que muestra como el coeficiente de momento varia con respecto a la ubicación de este Cg y al ángulo de ataque de la misma. En este diagrama se ubica el centro de gravedad a diferentes distancias y se simula en XFLR-5 para obtener la curva polar de Coeficiente de momento respecto al ángulo de ataque. En la gráfica siguiente se ubicaron 5 centros de gravedad (Figura 8) en donde en el  $x_{cg1}$  se ubica al 15% de la cuerda media aerodinámica del perfil, subsecuentemente  $x_{cg2}$  al 25%,  $x_{cg3}$  al 30%,  $x_{cg}$  que es el punto neutro en que el así se varié el ángulo de ataque de la aeronave, el coeficiente de momento no cambia y está ubicado al 62%, y finalmente el que presenta un comportamiento inestable en vuelo  $x_{cg4}$  al 70% (Figura 9), siendo este un parámetro importante para la ubicación del Centro de gravedad del avión para tener un vuelo estable.



**Figura 8.** Ubicación del centro de gravedad para vuelo estable

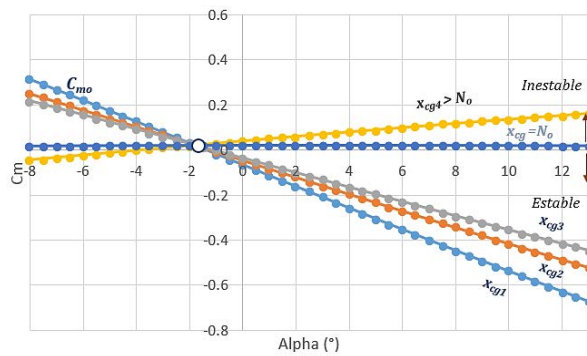


Figura 9. Diagrama de TRIM de la aeronave Aquila

## 5.4 Análisis de Dinámico de la Aeronave

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente simulados y partiendo de los datos obtenidos en el modelo 3-D, se efectúa un análisis de estabilidad de la aeronave del cual se determinan las derivativas de control y estabilidad que permiten generar funciones de transferencia que finalmente podrán ser implementadas en sistemas de control y así tener un vuelo posiblemente autónomo.

## 5.5 Derivativas Longitudinales

Para determinar las derivativas se hizo uso del programa XFLR-5 que en el momento de realizar la simulación genera un archivo del cual se pueden extraer estos valores. Teniendo en cuenta que para cada eje se presenta una gran cantidad de derivativas, solo se tendrán en cuenta las derivativas que tienen un impacto en mayor porcentaje sobre el sistema (Tabla 10).

Tabla 10. Derivativas Longitudinales Aquila XFLR-5

Principales derivativas longitudinales			
$Cl_\alpha$	$Cm_\alpha$	$Cl_q$	$Cm_q$
5.2391	-1.214	8.9971	-18.451

Para contextualizar cada uno de los valores anteriormente mostrados es necesario determinar cada una por aparte:

1.  $Cl_\alpha$ : representa el valor de la pendiente de la curva de la sustentación de la aeronave, el signo positivo indica que la sustentación se desarrolla de manera continua
2.  $Cm_\alpha$ : Relaciona el coeficiente de momento respecto al ángulo de ataque de manera longitudinal en el cabeceo de la aeronave, indicando que para valores negativos de esa constante el avión se le inducirá un momento que hará que la nariz de la aeronave baje lo que es deseado para evitar que la aeronave entre en pérdida.
3.  $Cl_q$ : Relaciona el valor del coeficiente de sustentación con respecto a la tasa de cabeceo de la aeronave, ya que al variar el cabeceo induce ángulos de ataque que repercuten directamente sobre la sustentación.
4.  $Cm_q$ , Indica el momento inducido por el cabeceo de la aeronave en todo el sistema.

## 5.6 Derivativas Lateral - Direccional

Las derivativas de estabilidad lateral-direccional muchas veces actúan acopladas, pero en este caso para facilidad de su determinación serán enunciadas como Roll y Yaw respectivamente, estas pueden ser expresadas en valores de momentos, fuerzas u aceleraciones bajo la condición que se esté evaluando

### 5.6.1 Roll

1.  $Cyp$ : Corresponde a la fuerza lateral a causa de un cambio en el "roll" que la aeronave este experimentando.
2.  $Clp$ : Se le conoce como derivativa de damping-roll y es una medida del momento inducido de debido a un cambio de "roll" experimentado por la aeronave.
3.  $Cnp$ : Representa el momento inducido de "yaw" debido al "roll" que experimenta la aeronave (Tabla 11).

Tabla 11. Derivativas debido al Roll Aquila XFLR-5

Derivativas debido al Roll		
$Cyp$	$Clp$	$Cnp$
-0.025188	-0.54281	-0.002308

### 5.6.2 Yaw

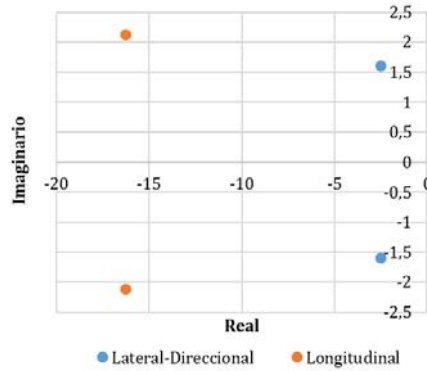
1.  $Cyr$ : Corresponde a la fuerza lateral a causa de un cambio en el "yaw" que la aeronave este experimentando.
2.  $Clr$ : Es el momento inducido de "roll" debido a un cambio de "yaw" experimentado por la aeronave.
3.  $Cnr$ : Representa el momento inducido de "yaw" debido a la variación de "roll" que experimenta la aeronave (Tabla 12).

**Tabla 12.** Derivativas debido al Yaw Aquila XFLR-5

Derivativas debido al Yaw		
$C_{yr}$	$C_{lr}$	$C_{nr}$
0.27493	0.04986	-0.13042

### 5.7 Diagrama Root-Locus

Uno de los parámetros que se usa para evaluar la estabilidad dinámica de una aeronave, es el diagrama Root-Locus que relaciona el sistema dinámico de esta con comportamientos de sistemas amortiguados, permitiendo así contrastar datos de si el avión es estable y tiende a retornar a su posición de equilibrio o si por el contrario cada vez aumenta la amplitud de su oscilación. Este diagrama (Figura 10) presenta una parte real y otra imaginaria sobre las cuales se evalúa la estabilidad total del sistema.



**Figura 10.** Diagrama de Root locus

Para realizar el análisis de estabilidad se tuvieron en cuenta los parámetros que establece por XFLR5, teniendo en cuenta únicamente las ganancias de las superficies de control, las cuales fueron determinadas como 1°/unidad, es decir que el elevador va a tener una ganancia de valor 1 por cada grado que se deflece. Para las respuestas en el tiempo se tomaron 2 modos:

- Control de Elevador: LONGITUDINAL Modo1
- Control de incidencia estabilizador horizontal: LONGITUDINAL Modo2

La respuesta en el tiempo se basa en el modelo “state space”, el cual está dado por la ecuación (1) [8].

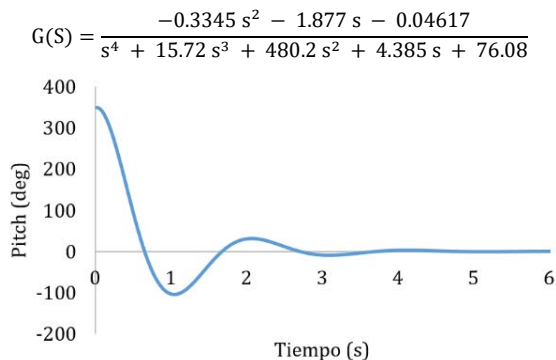
$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

Teniendo en cuenta las derivativas de estabilidad determinadas con anterioridad es posible encontrar las matrices A y B expresadas en la ecuación (2) [8].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Es necesario que las funciones de transferencia se determinan bajo la metodología de “state-space” con la ayuda de MATLAB, usando los comandos ss y ss2tf, teniendo en cuenta la matriz de estado para cada uno de los modos seleccionados. La Figura 10 muestra la respuesta en el tiempo longitudinal, junto con la matriz de estado y la función de transferencia correspondiente.

$$A = \begin{bmatrix} -0.0061462 & 0.21526 & 0 & -9.81 \\ -0.550908 & -6.73188 & 34.3988 & 0 \\ 0.153877 & -12.1974 & -8.97996 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0.779140 \\ -30.8495 \\ -334.4809 \\ 0 \end{bmatrix}$$



**Figura 10.** Respuesta en el tiempo modo longitudinal, deflexión de elevador



Finalmente, la aeronave Aquila se encuentra en la fase de vuelos de pruebas, con el fin de validar la teoría y establecer las características de operación para las misiones establecidas, esta campaña de vuelos busca detectar las configuraciones de carga y peso máximo, con el fin de establecer limitantes operacionales, en la figura 11 se puede visualizar el primer vuelo de la aeronave Aquila.



**Figura 11.** Vuelo de prueba aeronave Aquila

## 6. CONCLUSIONES

Para desarrollar el adecuado estudio de la aeronave Aquila, no solo es necesario el estudio dimensional, de rendimiento y dinámica de vuelo, sino que necesita realizar vuelos reales para contrastar mejor los datos obtenidos con los cálculos teóricos y así obtener un modelo más cercano y exacto.

Teniendo en cuenta los análisis de rendimiento del Avión, se observa que los valores para tasa de ascenso y ángulo de ascenso son parámetros de gran relevancia en el estudio; ya que la condición que se quiere medir es en ascenso sostenido, por lo que se hace necesario que el desempeño de la aeronave en esta condición sea óptimo para arrojar datos adecuados a su uso

Bajo el análisis dinámico de la aeronave y teniendo en cuenta el diagrama obtenido en XFLR-5 del modelo del avión de coeficiente de momento respecto ángulo de ataque, se determina que es una aeronave con un comportamiento estable en su eje longitudinal teniendo en cuenta la ubicación de su centro de gravedad a lo largo del perfil y como la variación de esta distancia respecto al centro de presiones afecta la estabilidad del sistema

La determinación de las derivativas de control y estabilidad son de vital importancia para futuros estudios ya que haciendo uso de estos valores se puede otorgar a la aeronave la capacidad de un vuelo autónomo, lo que le genera mayor capacidad operativa a la aeronave y un mejor desempeño en vuelo ante cualquier perturbación, estos valores son el insumo inicial para realizar la configuración de los controladores PID que rigen el vuelo en ascenso circular.

## REFERENCIAS

- [1] Jimenez, P., Zuluaga, E. & Téllez, A. (2016). Validación de rendimiento y dinámica de vuelo de una aeronave no tripulada multipropósito. En Serna, M.E. (Ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 1ª ed. (pp. 120-134). Medellín: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [2] Jiménez, P. (2017). Diseño de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para medición de gases de efecto invernadero. En Serna, M.E. (Ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 1ª ed. (pp. 120-134). Medellín: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [3] Gundlach, J. (2012). *Designing Unmanned Aircraft Systems: A Comprehensive Approach*. Reston Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [4] Anderson, J. (1999). *Aircraft Performance and Design*. McGraw Hill.
- [5] Illinois University (sf). UIUC Airfoil Data Site. UIUC Applied Aerodynamics Group.
- [6] XFLR5 (2009). *XFLR5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers. Guidelines for QFLR5 v0.03*.
- [7] Jimenez, P. et al. (2017). *Diseño, análisis y validación de aeronaves no tripuladas*. Editorial Bonaventuriana.
- [8] Pamadi, B. (2004). *Performance, Stability, Dynamics, and Control of Airplanes*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Giovanni Barrera T.<sup>1</sup>

Erika Imbeth Solange<sup>2</sup>

Luisa M. Hernández<sup>3</sup>

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Medellín – Antioquia

En la última década el desarrollo tecnológico en cuanto a procesos de manufactura ha avanzado a una velocidad muy rápida, con la explosión de la nanotecnología fue abierta una ventana hacia nuevos y consolidados desarrollos. La manufactura aditiva está enfocada al uso más eficiente de materia prima y al mínimo de producción de residuos; un caso puntual es el de la inyección 3D, donde a partir del diseño asistido por computador fue posible manufacturar productos más rápidamente y con mayor complejidad morfológica que los métodos convencionales de fabricación. Con el advenimiento de esta tipología de procesos se suma la infinita posibilidades de soluciones a necesidades en la industria a partir del estudio y conocimiento de sistemas naturales; es mencionado el caso de la guadua *Angustifolia Kunth* como referente vegetal, otro caso estudiado más profundamente ha sido la exploración funcional de la concha del nácar, con la cual fue posible realizar caracterización a través de técnicas como la microscopía electrónica de barrido y posterior simulación de la estructura a partir del uso de software de diseño. Fueron originadas algunas muestras para el análisis de resistencia frente al impacto. La aplicación de la manufactura aditiva en el avance de la ciencia ha crecido sustancialmente las últimas dos décadas, así es posible mencionar que es una herramienta que aún se encuentra en estado incipiente y con muchas necesidades esperando ser resueltas desde la biomedicina hasta la ingeniería civil a través del diseño industrial.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la última década del desarrollo humano se han incrementado los avances tecnológicos en todas las áreas del conocimiento, una de estas son los procesos de manufactura en los cuales el diseño y desarrollo de prototipos con formas orgánicas o de gran complejidad ya no son un problema para la elaboración de un prototipo. Esta situación fue modificada durante el proceso de dar solución a la necesidad de buscar posibilidades orientadas al proceso de obtención de modelos con una alta fidelidad al diseño. Una de las alternativas de fabricación más utilizada es la impresión 3D.

El objetivo de esta investigación está enfocado a presentar la aplicabilidad de la impresión 3D para procesos de diseño industrial simulando la estructura natural de la guadua *Angustifolia Kunth* (GAK). Para este proceso se toma como referente a la biomimética, la cual es un área orientada a la optimización de sistemas productivos emulando comportamientos observados en la naturaleza. Por consiguiente, se presentará un acercamiento a los diferentes usos de la impresión 3D, analizando materiales, morfologías junto a otros trabajos de investigación en los cuales se apoya esta investigación. Este estudio preliminar es el resultado de la búsqueda de información en las bases de datos, así como en diferentes sitios de internet y otras publicaciones, asociadas a las mejores prácticas de biomimética apoyada en Manufactura Aditiva.

## 2. MANUFACTURA ADITIVA

La manufactura aditiva es fundamentalmente una diferente forma de la manufactura tradicional formativa o sustractiva tales como fundición, troquelado, extrusión, rotomoldeo entre otros; la combinación de la terminología ISO/ASTM define la fabricación aditiva como el "proceso de unión de materiales para hacer partes originadas de un diseño en 3D, generalmente capa sobre capa, en contraste con la fabricación sustractiva y las metodologías de fabricación formativa" [1].

Este proceso está más cercano a la manufactura *bottom up*, donde la construcción de un producto es realizada capa por capa hasta completar la forma originada desde un archivo de diseño asistido por computador (CAD); este proceso está siendo más aprovechado que la fundición o las otras tecnologías de conformado, como el caso del proceso de conformado por mecanizado. La manufactura aditiva es versátil, flexible, personalizable y puede adaptarse a muchos sectores de la producción industrial. Los materiales aplicados en este tipo de procesos tienen un amplio rango, los metales, los cerámicos, los polímeros, que a su vez pueden ser combinados para obtener híbridos, compuestos o mezclas con un grado de funcionalidad; los cambios permanecen en transferir estas formas a objetos que serán funcionales y con un potencial muy alto para ser un camino de ruta para la producción industrial en el futuro próximo [2]. La organización internacional para la normalización ISO/ Sociedad americana para ensayos de materiales (ASTM) 52900:2015 Clasificación estándar, procesos AM se enmarcan a estos procesos en siete categorías, citadas a continuación:

---

<sup>1</sup> [giovannibarrera@itm.edu.co](mailto:giovannibarrera@itm.edu.co)

<sup>2</sup> [erikaimbethvargas@itm.edu.co](mailto:erikaimbethvargas@itm.edu.co)

<sup>3</sup> [luisamahernandez@itm.edu.co](mailto:luisamahernandez@itm.edu.co)

1. *Aglutinante a chorro* (bj). Similar a una impresora de chorro, imprime pequeñas capas de polvos (3D inkjet technology), permite un amplio rango de diseño, dimensión de inyección en el eje X menos de 4000mm, en el eje Y menos de 2000mm y en el eje Z menos de 1000mm; es posible imprimir con materiales poliméricos, cerámicos, compuestos, metales e híbridos. Las marcas representativas son ExOne de USA y Poly Pico de Irlanda.
2. *Deposición directa de energía* (ded). Fusión con energía térmica durante la deposición. Técnicas de deposición de láser, rayo de electrones, plasma y fusión como ventajas presentan alto grado de control de tamaño de grano, alta calidad en las piezas y múltiples aplicaciones. Como desventaja esta que es orientado solamente para metales y metales híbridos. Las dims de uso son en el eje X 600-3000 mm; en el eje Y 500-3500 mm y en el eje Z 350-5000 mm. Algunas de las empresas líderes en el mercado son: Optomec, USA; Sciaky, USA, Irepa, Francia y la alemana Trumpf.
3. *Extrusión de material* (me), esta técnica está enfocada a la deposición y fabricación por filamentos y capas, como ventajas presenta: amplia aplicación, es posible construir partes completamente funcionales; como desventajas presenta: isotropía vertical y no es muy amable con los detalles. Es posible utilizarla solamente con materiales poliméricos y compuestos. El tamaño de uso oscila entre 600 a 900 mm. La empresa que representa esta técnica es la norteamericana Stratasys.
4. *Material a chorro* (mj). El material es depositado en forma esférica, aplica tecnología 3D Inkjet., produce pocos desperdicios, puede ser usada para productos con partes múltiples y multicolores, presenta como desventajas que: es relativamente lenta, no presenta buena integridad estructural y el acabado depende del precursor. Es utilizada para polímeros, cerámicos, biológicos, híbridos y compuestos; el tamaño de uso es para piezas pequeñas oscila entre 200 a 350 mm. Algunas de las empresas líderes son: las norte-americanas Stratasys, 3D systems y Wasp de Italia.
5. *Fusión del lecho en polvo* (flp). Utiliza energía térmica que funde el polvo por regiones, a medida que avanza la fabricación del producto. Fusión por chorro de electrones, sinterizado de metal por sinterizado con láser, relativamente menos costosa; poca huella de carbono. Como desventajas están que es relativamente lenta, bajas propiedades mecánicas, limitadas dimensiones, se necesita alto poder, los acabados dependen del precursor. Utilizada en metales, cerámicas, polímeros, compuestos e híbridos; las dims de conformado están entre 200 a 300 mm. Empresas tales como Arcam de Suecia, EOS, MTT de Alemania, System Group de Francia, entre otras.
6. *Laminación de hojas* (sl). material manufacturado por laminado y por ultrasonido, la unión de las partes depende del adhesivo utilizado; los acabados precisan de post proceso; es factible la utilización de polímeros, de metales, de cerámicas y de materiales híbridos como materia prima. Las dimensiones de uso son reducidas, varían desde 100 hasta 250 mm y son desarrolladas en empresas tales como 3D Systems USA o MCor de Irlanda.
7. *Foto polimerización* (vp). La técnica de estereolitografía y proceso de luz digital, son utilizadas en partes largas; presentan excelentes acabados y detalles. La técnica es limitada a fotopolímeros, los cuales presentan bajas propiedades mecánicas, usualmente el material precursor es costoso y de lenta producción, se usan algunos polímeros y cerámicos; las dimensiones usuales para el eje X menos de 2100 mm eje Y 700 mm y eje Z menos de 800 mm. Algunas empresas que lideran el proceso son: Lithoz de Austria y 3D Ceram de Francia [3].

A partir del conocimiento de las posibilidades de aplicación de esta tecnología ahora se presentan los usos específicamente en el desarrollo con diseño industrial. A través del uso de las tecnologías de prototipado rápido o fabricación aditiva ofrece la oportunidad de desarrollo de nuevas propuestas utilizando geometrías naturales, antes vistas como muy complejas. Algunas empresas fabricantes de audífonos como son: Siemens, Phonak, Widex, usan máquinas de sinterización láser selectiva y estereolitografía para producir nuevos diseños; la empresa Align Technology usa estereolitografía para fabricar moldes. La empresa Boeing y sus proveedores usan estas tecnologías para producir conductos y piezas similares para aviones de combate F-18. Las tecnologías de manufactura aditiva permiten fabricación con bajo volumen de producción; en términos generales las capacidades únicas de las tecnologías de manufactura aditiva (AM) permiten oportunidades de personalización, mejoras en el producto, multifuncionalidad y menores costos generales de fabricación. Entre las características líderes de la manufactura aditiva están:

- *Complejidad de forma*: es posible construir prácticamente cualquier forma, los tamaños de lote de uno son prácticos, las geometrías personalizadas se logran fácilmente y la optimización de forma está habilitada.
- *Complejidad del material*: el material se puede procesar en un punto o en una capa, a la vez, lo que permite la fabricación de piezas con composiciones complejas de materiales y gradientes de propiedad diseñados.
- *Complejidad jerárquica*: las estructuras jerárquicas a escala múltiple se pueden diseñar y fabricar desde la microestructura a través de meso estructura geométrica (tamaños en el rango milimétrico) hasta la macroestructura a escala parcial [4].

### 3. MATERIALES

Dentro de los materiales, se puede decir que representativos en los metales son: el aluminio, titanio y aceros inoxidables como los principales constituyentes en el proceso, en presentación de polvos con la finalidad de ser

utilizados en manufactura de metal aditivo. Los materiales enfocados a la construcción de infraestructura en el futuro próximo, entre estos el concreto para impresión 3D en tema de ingeniería civil; otra aplicación está en exploración espacial, se tiene previsto el uso del polvo lunar como material para construcción de una futura base espacial, así como las exploraciones al planeta Marte. Una buena cantidad de polímeros han sido considerables para el uso de impresión 3D, estos materiales han sido clasificados en una perspectiva de materiales hacia la industria 4.0 [5], estos materiales son mostrados en la Figura 1.



**Figura 1.** Resumen general de los materiales de investigación actuales para AM en la próxima era

Con el desarrollo de técnica de tomografía computarizada (TC) y tecnología de resonancia magnética (MRI) tridimensional las imágenes de tejidos, órganos y sistemas naturales, antes imposibles de observar sin perjudicar la muestra, se han vuelto más accesibles. Ahora es posible analizar detalladamente la morfología y con mayor resolución. Hoy en día al utilizar los datos de imagen adquiridos de tejidos en pacientes y/o órganos específicos con intrincada micro-arquitectura 3D, es posible la reproducción por tecnología de impresión 3D, tal cual como lo ha venido realizando la firma Belga Materialise® [6]. Los materiales poliméricos actualmente se han utilizado para la impresión en el campo de aplicaciones biomédicas, las cuales se basan en polímeros derivados naturalmente (gelatina, alginato, colágeno, etc.) o moléculas de polímeros sintéticos (polietilenglicol (PEG), poli ácido láctico-co-glicólico (PLGA), poli (alcohol vinílico) (PVA), etc.).

Los rasgos deseados de materiales imprimibles para aplicaciones biomédicas son imprimibilidad, biocompatibilidad, buenas propiedades mecánicas y propiedades estructurales [7]. Una de las técnicas poco mencionadas en cuanto a manufactura aditiva es la técnica de electrohilado, la cual consiste en tomar un polímero en solución para producir fibras en tejidos previamente diseñados con una funcionalidad previa, esta técnica ha sido empleada en área textil para la fabricación de filtros, balística, biomedicina entre otras áreas; el electrohilado proporciona una práctica sencilla para producir fibras de polímero con diámetros que van desde 40 hasta 2000 nm. Las pequeñas fibras pueden soportar matrices de nanomáquinas y conectar matrices integradas a sistemas de mayor escala; para realizar la caracterización de estas fibras se tienen algunas técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM) y con el microscopio electrónico de transmisión (TEM); la observación a escala nanométrica las máquinas conectadas a las fibras proporcionarán formas útiles para usar y observar nanomáquinas. Entre los polímeros aplicados a esta técnica se encuentran los mencionados en la Tabla 1 [8], los cuales están en vía de utilización en las técnicas de impresión 3D, debido a la alta posibilidad de ser manipulados en estado semiviscoso.

**Tabla 1.** Polímeros utilizados usualmente en electrohilado

Clase de polímero	Polímero	Solvente
Polímeros de alto comportamiento	Poliamidas	Fenol
	Ácido poliamico	m-cresol
	polieterimida	cloruro metilo
Polímeros de cristal liquido	Poliaramida	Ácido sulfúrico
	Poli-gama benzilglumato	
Copolímeros	Poli(p-fenileno tereptalamida)	Ácido fórmico
	Nylon 6-poliaramida	
Fibras textiles de Polímeros	Poliacrilonitrilo	Dimetil formamida
	Polietileno tereftalato	Ácido trifluoro-acético y diclorometano,
	Nylon	fusión en vacío
Polímeros conductores eléctricos	Polianilina	Acido fórmico
Biopolímeros	DNA	Ácido sulfúrico
	Polihidroxibutirato-valerato	Agua
		cloroformo

#### 4. DESARROLLO DE MATERIALES CELULARES

El concepto de materiales celulares diseñados está motivado por el deseo de poner el material sólo donde se necesita para una aplicación específica. Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, una ventaja clave ofrecida por los materiales celulares es la alta resistencia acompañada de una masa relativamente baja; estos materiales pueden proporcionar buenas características de absorción de energía y de aislamiento térmico y acústico también. Los materiales celulares incluyen espumas, panales, celosías y construcciones similares. Cuando las longitudes características de las celdas están en el rango de 0.1 a 10 mm, puede hacerse referencia a estos materiales como materiales meso-estructurados. Los materiales meso-estructurados que no se producen utilizando procesos

estocásticos (por ejemplo, formación de espuma) se denominan materiales celulares diseñados. En este documento, nos centramos en los materiales de celosía diseñados [9]. En la Figura 2 es posible observar la morfología de un vegetal celular, es el caso de la esponja de la Luffa.

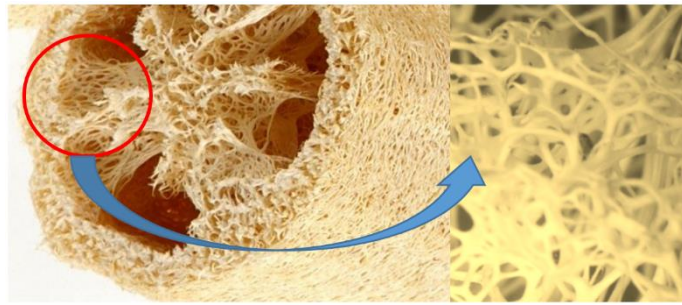


Figura 2. Celdas naturales provenientes del endocarpio de la Luffa

#### 4.1 Materiales aeroespaciales

El efecto de la gravedad se aplica tanto a la tecnología como a la naturaleza, como se puede ver en los diseños característicos de los materiales biológicos, un ejemplo son los picos y los huesos de las aves. La optimización aparente del peso y resistencia a través de estructuras tipo sándwich que consisten en cáscaras sólidas rellenas con núcleos celulares compatibles; el núcleo aumenta significativamente las capacidades de pandeo de todo el sistema mientras se mantiene el peso ligero requerido para el vuelo. Esta sinergia entre una carcasa dura y un núcleo abatible también se exhibe en otras estructuras biológicas que requieren resistencia contra el pandeo axial. Tallos de las plantas son un ejemplo de esto.

Los ejemplos citados consisten en estructuras cilíndricas de paredes delgadas llenas de núcleo celular. Su gran relación de aspecto crea un problema de ingeniería interesante que se ha planteado tanto en la naturaleza como en la tecnología. Un ejemplo de aplicación en el cual es posible desarrollar un material multifuncional experimental. El diseño de la naturaleza ha resistido las pruebas, mostrando mejoras mecánicas significativas con un aumento de peso limitado. Además, se aborda el problema del pandeo axial en estructuras con altas proporciones de aspecto [10].

Otro ejemplo de análisis a sistemas naturales fue el análisis de la sección transversal a la guadua *Angustifolia Kunth*, se realizó un corte transversal posteriormente dividido en tres capas o zonas en el espesor total: periferia y transición que se denominó como zona externa y correspondió al 15,3% del espesor total; la zona media con un 73,9% del espesor total y la zona interior con un 10,8 % del espesor total. Estudio realizado por Jairo A. Osorio Saraz, J.M. Vélez y Ciro Velázquez [11], en la Figura 3 es posible observar esta caracterización.

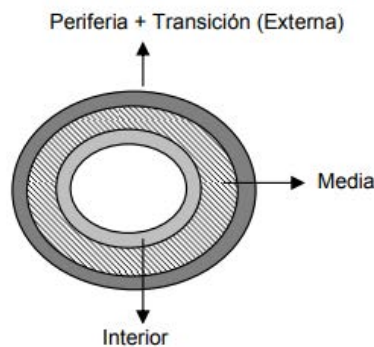


Figura 3. Vista transversal de la pared del culmo en una muestra de Guadua [11]

### 5. APLICACIONES OBTENIDAS A TRAVÉS DE MANUFACTURA ADITIVA

En el área de balística el desarrollo de avanzada resistencia a los impactos y energía absorbente, los materiales son vitales para la protección de los soldados, la integridad de las estructuras aeroespaciales y civiles, y la seguridad de los ocupantes de los distintos sistemas de transporte. Con las nuevas tecnologías es posible además del enfoque tradicional en el diseño de nuevos sistemas de materiales a través de la optimización de ingeniería, la inspiración de soluciones probadas en la naturaleza ha creado nuevos paradigmas en la disciplina de mecánica de materiales; estos motivos motivan al estudio de los sistemas biológicos y así comprender las propiedades tales como: alta resistencia específica, alta especificidad, dureza y resistencia al impacto.

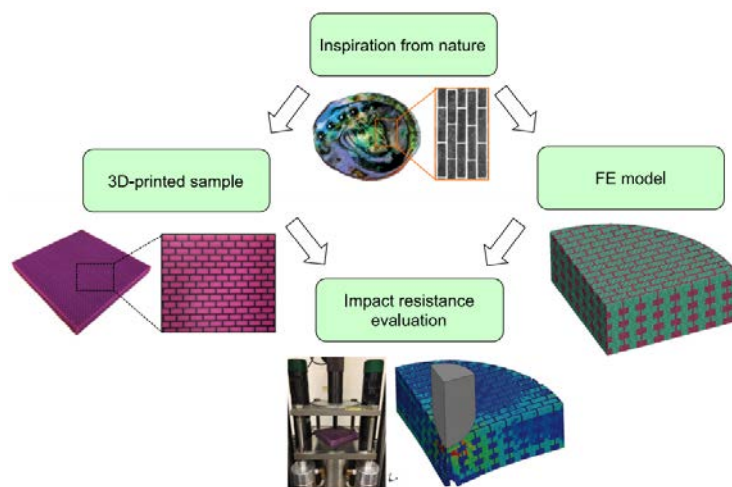
Estudiaron las características de un molusco, el *nacre*, conocido por guardar en su interior a las apreciadas perlas; este molusco combina propiedades superiores de resistencia al impacto, que luego de una detallada observación fue posible identificar una formación en bloques como un muro, se presume esta morfología fue originada hace millones de años como sistema de protección contra predadores, prolongando la supervivencia de la especie. Las conchas de los moluscos gasterópodos son compuestas en capas de tres materiales diferentes que los protegen de los

depredadores: el periostraco proteínico externo, el prismático duro interno y las capas de nácar interno resistente. En el nácar, el compuesto biológico presentado está compuesto de un 95% en peso de contenido mineral y un 5% en peso de matriz biopolimérica blanda, la cual está estructurada en una disposición de ladrillo y mortero. Se puede observar una estructura similar en el hueso, un material con composición jerárquica, la cual está compuesta de moléculas de proteína a base de colágeno y nano partículas minerales de hidroxiapatita.

Fue posible analizar el ensamblaje en este material, puesto que es un material resistente, liviano y multifuncional que proporciona una estructura protectora y de soporte para el cuerpo, se observó que tanto el hueso como el nácar exhiben mecanismos de endurecimiento tales como desviación de grietas, microfisuras y puentes de grietas a diferentes escalas de longitud. El desarrollo del prototipo a través de impresión 3D fue realizada de la siguiente forma: La fabricación aditiva de los materiales compuestos con aspecto de nácar con dos materiales de base diferentes se ejecuta con una impresora multi-material Stratasys Connex 3 con una resolución de 16 micrómetros en dirección fuera del plano, con las direcciones en el plano con la misma magnitud de resolución. Los dos materiales base son los fotopolímeros Stratasys patentados, Veromagenta y Tangoblackplus.

El grado Veromagenta es el material comparativamente más rígido, mientras que el grado Tangoblackplus es más flexible y parecido al caucho. Estos se denominaron materiales rígidos y blandos, respectivamente. Para las pruebas, fueron impresas muestras compuestas con aspecto de nácar junto con muestras rígidas y blandas homogéneas. Los materiales compuestos están impresos con una tecnología de inyección de materiales múltiples que permite la impresión simultánea de hasta tres materiales diferentes.

En otra investigación, los materiales foto-poliméricos fueron canalizados desde cartuchos a través de cabezales de impresión, los cuales arrojaron finas gotas líquidas de materiales a la superficie. En la impresora se tiene ocho cabezales de impresión en total, reservados para los tres materiales base y de soporte; una lámpara ultravioleta recorre los cabezales de impresión, curando inmediatamente el material después que es extruido. Al ser un proceso instantáneo de curado, se logra una excelente adhesión entre materiales. En la Figura 3, está ilustrado el proceso completo de obtención de las muestras, que posteriormente fueron caracterizadas respecto a la resistencia al impacto principalmente. Estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts(MIT), el profesor Markus J. Buehler y equipo [12].



**Figura 4.** Metodología de investigación que incluye inspiración desde la naturaleza, creación con análisis de elementos finitos [1]

Fue validada la hipótesis de que el diseño de tipo nácar tiene un alto potencial de superar a los sistemas balísticos tipo monolíticos; el mecanismo de disipación de energía cinética fue acompañado por la presencia de un área de contacto ampliada a lo largo con la formación de microfisuras.

Un año después fue realizada una investigación en la cual se profundizó en las propiedades del nácar; fueron estudiados los efectos de parámetros estructurales, tales como, la fracción de volumen de la fase mineral y escala de longitud de los ladrillos minerales (MB), llamados así a los módulos biomorfo del molusco en escala micrométrica, también fue estudiada la respuesta mecánica del aditivo inspirado en el nácar desarrollados como compuestos manufacturados. Con el advenimiento de la fabricación aditiva, es posible diseñar y fabricar rápidamente una enorme cantidad de geometrías diversas y complejas, lo que permite un estudio metódico de diferentes diseños.

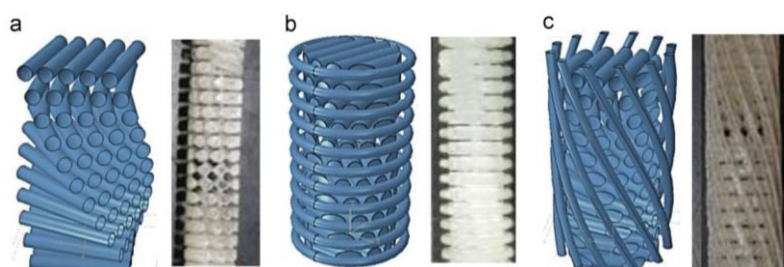
Fueron estudiadas algunas impresiones, por un lado, una fase rígida y por otro lado una fase suave con las cuales fue simulado el mineral rígido y la matriz de bio-polímero blando, respectivamente. Se estudiaron cinco contenidos diferentes de fracción de volumen rígido: 50%, 60%, 70%, 80% y 90%. Las geometrías fueron generadas con AutoCAD 2016 (Autodesk, Inc.). Los modelos 3D se crearon al extruir el diseño 2D en archivos de estereolitografía (.stl). Posteriormente fueron realizadas las muestras utilizando una impresora 3D Objet500 Connex3, fabricada por Stratasys. La capacidad de la impresora para imprimir simultáneamente materiales múltiples y distintos con una interfaz casi perfecta la hace ideal para pruebas en sistemas compuestos.

Dos de los plásticos comerciales de Stratasys, VeroMagenta (RGD851) y Tango Black Plus (FLX980), fueron utilizados para la creación de material compuesto; VeroMagenta constituye el componente rígido, que represento las plaquetas de carbonato de calcio de nácar, y Tango Black Plus que es un componente blando, fue utilizado en lugar de la interfaz del biopolímero blando hallado en el nácar con una rigidez de tres órdenes. El análisis reportado muestra que únicamente con el aumento en el número de MBs agrego más beneficio al rendimiento en términos de fuerza, pero no en términos de dureza. Al aumentar la cantidad de puentes es posible aumentar la dureza hasta un cierto umbral, más allá del cual la tenacidad se descompone.

El umbral de puenteo corresponde a un número crítico de puentes (alrededor de nueve), por encima de los cuales el material se vuelve más frágil. Esto es probablemente debido a un dominio de longitud de corte limitado, que limita las deformaciones a una región restringida, que afecta la disipación de energía y el modo de falla. Este fenómeno es una reminiscencia del mecanismo de curado en polímeros termoendurecibles. La reticulación generalmente mejora las propiedades de los termoestables y cauchos (resistencia mecánica, la rigidez de las micro perlas de polímero); sin embargo, al aumentar el grado de reticulación por encima de un cierto umbral puede causar la fragilización del polímero. Desde un punto de vista fenomenológico, esto corresponde al hecho de que las cadenas de polímero entre dos enlaces cruzados consecutivos tienen un límite dominio de deformación (para permitir el desenredado de la cadena y el deslizamiento y estiramiento de la cadena del polímero) [13].

En otro ejemplo de aplicación de impresión 3D a partir de bio-análisis funcional, se analizaron tres tipos de estructuras de fibras helicoidales, las cuales son observadas habitualmente en las plantas, tales como: madera, bambú, plantas inferiores y flores. Las morfologías fueron simuladas a través de software de diseño industrial y posteriormente impresas en máquina 3D, como material base fue utilizada la resina poliéster RGD 720 de Stratasys (Stratasys Ltd., Rehovot, Israel). Las formas incluyen tres tipos de morfologías, de llanura, de anillo y de hélice. Los núcleos observados incluían un total de treinta y ocho capas de fibras giradas, y la rotación entre capas de fibras adyacentes era de  $163^\circ$ . Las estructuras simples eran compuestas por núcleos helicoidales en especímenes de anillo y hélice. Las muestras incluyeron refuerzos anulares alrededor de anillos helicoides con un diámetro de 1 mm en la sección transversal radial, el diámetro del anillo interno es de 8,2 mm. Las muestras de hélice incluían doce hélices alrededor de helicoides con un diámetro de 1 mm y ángulos de inclinación de  $69^\circ$ . La relación de volumen de fibra en los especímenes planos es de 0,22; mientras que las relaciones de volumen de fibra en los especímenes de anillo y hélice fueron 0,30.

Las matrices de resina de poliéster (Fiber Glass Coatings Inc, St. Petersburg, FL) se añadieron gradualmente a los moldes, y los conjuntos se golpearon suavemente durante 45 minutos para eliminar las burbujas de aire. Después de eso, se colgaron los ensambles para asegurar una buena alineación de los núcleos helicoidales. El período de curado duró tres semanas antes de que los especímenes poliméricos reforzados con fibras se eliminaran de los modelos impresos con tecnología 3D junto a las muestras naturales se muestran en la Figura 5, a la izquierda los modelos realizados en software de diseño, listos para la impresión 3D; a la derecha de los modelos se observan los prototipos ya impresos.

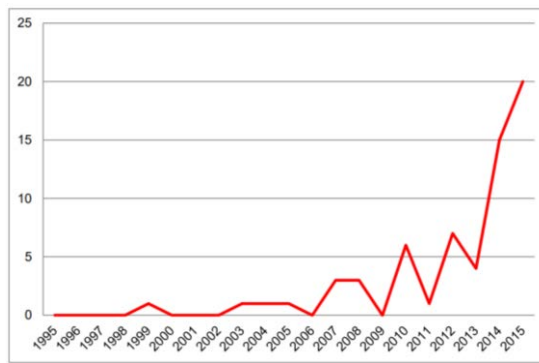


**Figura 5.** Estructuras fibrilares analizadas, a) planares; b) anillos y c) hélices [14]

Las muestras simples con la menor cantidad de fibra exhibieron la mayor resistencia al corte, mientras tanto, con las mismas proporciones de volumen de fibra entre las muestras de anillo y hélice, las muestras de hélice mostraron una mayor resistencia al corte que las muestras en anillo debido a la protección continua a través de las capas de fibra giradas en hélices. Además, a este factor, los niveles de tensión en los refuerzos de hélice aumentaron sustancialmente cuando los módulos de las fibras fueron superiores a los de la matriz. Entre estos factores, los ángulos de paso de los refuerzos de hélice tuvieron un efecto significativo sobre la resistencia al corte, a  $45^\circ$  se logró la mayor resistencia al corte debido a que las hélices son más eficientes para resistir las principales tensiones de tracción bajo torsión, reportado por el equipo de Brian Ribbans, Yujie Li y Ting Tan de la universidad de Vermont, USA [14].

Por último, se tuvo en cuenta en esta breve reseña sobre el uso de la técnica de manufactura aditiva impresión 3D, que es de carácter estratégico abordar esta temática para intentar optimizar sistemas existentes, a través de la búsqueda de soluciones en la naturaleza. En un estudio realizado por la universidad de Cambridge se identificó la creciente tendencia a nivel mundial por entender esta técnica; fueron halladas publicaciones desde la década de los años 90 hasta el año 2015, fue posible identificar un enorme salto de producciones entre el año 2014 a 2015 donde se partió de un promedio de 5 publicaciones al año a un límite superior de 20 publicaciones hasta el año 2015 [15], es posible analizar estos datos observando la ilustración de la Figura 6.





**Figura 6.** Tendencia en el incremento de investigaciones publicadas desde 1995 hasta el 2015 [15]

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación preliminar, respecto al uso de la impresión 3D como parte de una técnica de tantas observadas de la gran ola de Manufactura aditiva (AM), pueden constatar que: esta técnica está en una tendencia creciente hacia el desarrollo de productos a nivel industrial en áreas desde la medicina hasta la ingeniería civil.

La manufactura aditiva tomando como inspiración los diferentes seres vivos entre estos las plantas abren una gran oportunidad hacia la investigación aplicada, donde muy probablemente el resultado final será una innovación que llevará consigo beneficios para las comunidades académicas y sus socios de investigación, estamos frente a una herramienta poderosa para el avance de la ciencia y las formas de concebir el diseño de producto.

## REFERENCIAS

- [1] Bourell, D. et al. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 66, 659-681.
- [2] Tofail, S. et al. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today* 21(1), 21-37.
- [3] Lee, J., An, J. & Chua, C. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl. Matter.* 7, 120-133.
- [4] Rosen, D. (2007). [Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space](#). Online [May 2018].
- [5] Dilberoglu, U. et al. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11, 545-554.
- [6] <http://www.materialise.com/en/medical/software/mimics>. Online [May 2018].
- [7] Wang, X. et al. (2017) 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B* 110, 442-458.
- [8] Chun, D., Reneker, H. & Ksoo, I. (1996). Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. *Nanotechnology* 7, 216-223.
- [9] Gibson, L. & Ashby, M. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.
- [10] Meyers, M., Che, P. & Lin, A. (2008). Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science* 53, 1-20.
- [11] Osorio, C. et al. (2007). Determinación de la relación de Poisson de la Guadua angustifolia Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 6(2), 4067-4076.
- [12] Gu, X. et al. (2016). Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance. *Extreme Mechanics Letters* 9, 317-323.
- [13] Gu, G. et al. (2017). Printing nature: Unraveling the role of nacre's mineral bridges. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 76, 135-144.
- [14] Ribbans, B., Li, Y & Tan, T. (2016). A bioinspired study on the interlaminar shear resistance of helicoidal fiber structures. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 56, 57-67.
- [15] Pradel, P. et al. (2017). Designing end use components for additive manufacturing: Navigating an emerging field. *State of art*. University of Cambridge.

# Modelación de la calidad de agua del río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro, Valle del Cauca, mediante el modelo dinámico QUAL2Kw

Stephanie Lugo R.<sup>1</sup>

Javier E. Holguín G.<sup>2</sup>

Universidad Autónoma de Occidente  
Cali – Colombia

El río Cauca sufre la contaminación de sus aguas, lo que ha afectado la calidad del recurso. La CVC junto a la Universidad de Valle desarrollaron el Proyecto “Modelación del río Cauca” en donde se utilizó el modelo MIKE 11 para simular las características de la calidad de agua y se obtuvo una herramienta para precisar las intervenciones proyectadas en el río. Sin embargo, el alto costo de los softwares para la modelación de la calidad del agua como el MIKE 11, no permiten la aplicación de estas herramientas, disminuyendo la información para los actores involucrados con el recurso. En esta investigación, se plantea la aplicación de un modelo gratuito llamado QUAL2Kw (v6), que sirva en la gestión integrada del recurso hídrico y permita entender la dinámica de los procesos que afectan la calidad del agua del río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro, en el Valle del Cauca.

## 1. INTRODUCCIÓN

El control de la calidad de las aguas superficiales es de gran importancia económica y social, porque permite la recopilación de información, teniendo en cuenta los usos que se le dé al recurso, ya sea para el abastecimiento humano, la industria, la agricultura y otros. El río Cauca es el principal afluente del río Magdalena y constituye una de las arterias fluviales más importantes de Colombia. Nace en el páramo de Sotará, en la región conocida como el Macizo Colombiano, en el departamento del Cauca. Tiene una longitud total de 1350 kilómetros y en su trayectoria sigue una dirección Sur – Norte y recorre más de 180 municipios en los Departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquía, Córdoba, Sucre y Bolívar.

Con el objetivo de evaluar y proteger la calidad del agua del río Cauca, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), entidad encargada de administrar los recursos naturales renovables y el medio ambiente del Valle del Cauca, cuenta con una red de monitoreo donde se realiza periódicamente la medición de características hidráulicas, físicas, químicas y biológicas del agua en la zona. Por lo anterior, se cuenta con un gran volumen de datos que requieren un procesamiento que proporcione información de las relaciones entre las características mencionadas y factores externos de tipo hidrogeológico, climático y antrópico, que determinan el comportamiento de la calidad del agua en el recurso hídrico.

A partir de esta información, es posible predecir los diferentes procesos que ocurren en el río mediante la modelación matemática. Estos modelos permiten representar las respuestas de un sistema a un estímulo externo. El uso de modelos de calidad de agua como herramienta, permite a las autoridades ambientales el análisis de gran cantidad de información y la toma de decisiones mediante la planeación de estrategias que intervienen para mejorar la calidad del agua de los ríos y sus tributarios.

Entre las estrategias para el manejo de la calidad del agua de los recursos hídricos se encuentra la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales [1]. La GIRH está basada en la idea de que los recursos hídricos son un componente integral de los ecosistemas, un recurso natural y un bien social y económico, debido a que tiene un valor económico en todos sus usos. Por lo tanto, es necesaria la aplicación de herramientas que permitan a los diferentes usuarios del agua determinar la calidad del recurso para la obtención de beneficios sostenibles de los mismos.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Área de estudio

La zona de interés del proyecto corresponde al tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones de monitoreo La Balsa y Anacaro con una longitud de 389.1 km, en donde el río Cauca atraviesa el departamento del Valle del Cauca [2] (ver Figura 1). Este tramo de estudio se encuentra influenciado por la represa Salvajina que está situada en el corregimiento de Suárez, municipio de Buenos Aires en el Departamento del Cauca.

### 2.2 Información requerida por el modelo

Para implementar el modelo QUAL2Kw (v6) fue necesario recolectar la siguiente información de entrada del tramo en estudio:

---

<sup>1</sup> steluro1192@gmail.com

<sup>2</sup> jeholguin@uao.edu.co

- Las características hidráulicas: caudal, velocidad media, anchos, pendientes y profundidades de las secciones transversales.
- Información sobre calidad de agua para la cabecera, los tributarios, vertimientos y captaciones de agua.
- Información sobre calidad de agua para las estaciones ubicadas en el tramo de estudio.
- Información física: elevación o altitud (m) y coordenadas geográficas.
- Información de entrada de las condiciones meteorológicas: temperatura ambiente, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, porcentaje de cobertura de nubes.



**Figura 1.** Descripción general del área de estudio: Cuenca hidrográfica del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, Colombia con estaciones de muestreo

### 2.3 Herramienta de modelación

El modelo QUAL2Kw (6) opera como un reactor completamente mezclado, realiza un balance hidrológico en términos del caudal ( $Q$ ), un balance térmico en términos de la temperatura ( $T$ ) y un balance de masa en términos de concentración ( $C$ ) de cada constituyente. En estos elementos puede haber ganancia o pérdida de masa debido a procesos de transporte, fuentes externas o por fuentes internas y sumideros.

### 2.4 Esquematización del modelo

Para la esquematización del río Cauca entre las estaciones de monitoreo La Balsa-Anacaro se incluyeron en el modelo 84 fronteras internas, las cuales están representadas por 27 corrientes superficiales tributarias, 9 vertimientos de agua residuales domésticas, 11 de aguas residuales industriales y 37 extracciones de agua. En la esquematización se incluyeron en total 7 estaciones hidrométricas ubicadas en el tramo de estudio.

### 2.5 Datos de entrada

Para determinar las características hidráulicas del río se utilizaron los coeficientes empíricos de las curvas de calibración: velocidad-caudal y nivel-caudal [3]. Para realizar la calibración y verificación del modelo fue necesario contar con información de los caudales y de parámetros de calidad del agua de las fronteras del modelo. Para la construcción de las bases de datos se utilizó la información obtenida en las campañas de monitoreo del Proyecto Modelación del Río Cauca -Proyecto PMC [4]. Adicionalmente, se contó con dicha información agua para la estación de cabecera La Balsa y 6 estaciones ubicadas en el tramo de estudio, que se utilizaron como datos observados. Los parámetros de calidad del agua que se tuvieron en cuenta fueron Temperatura del agua,  $DBO_5$ ,  $DBO_U$ , OD y caudal. Respecto a la información meteorológica se utilizó la información histórica registrada para los días exactos de los monitoreos. Para la información de las coordenadas geográficas y altitud para cada tramo, se utilizaron las reportadas en los informes de CVC [5, 6].

### 2.6 Proceso de Calibración

El proceso de calibración consistió en realizar múltiples corridas del modelo hasta alcanzar los mejores ajustes entre los datos de campo y las respuestas del modelo en las estaciones.

#### 2.6.1 Calibración de Caudal

Para la calibración del componente hidráulico, se llevó a cabo tomando la Información de los coeficientes exponentes y coeficientes para las curvas velocidad-caudal y nivel-caudal. Durante la calibración se tuvo en cuenta el caudal de intercambio entre el río Cauca y el acuífero reportado [7] (Tabla 1). Este caudal se distribuyó a lo largo del tramo de estudio.

**Tabla 1.** Caudal promedio de intercambio entre el Río Cauca y el acuífero freático

Tramo	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)
La Balsa-La Bolsa	1.85
La Bolsa-Juanchito	0.42
Juanchito-Mediacaño	11.0
Mediacaño-Bocas Tuluá	15.9
Bocas Tuluá-La Victoria	4.2
La Victoria-La Virginia	6.42
Total	39.82

### 2.6.2 Calibración de Temperatura del agua

La temperatura fue el primer parámetro en ser calibrado considerando que los otros procesos simulados están influenciados por esta. El modelo toma como referencia los valores meteorológicos introducidos y determina la variación de la temperatura en el tramo de estudio.

### 2.6.3 Calibración del OD y DBO

Se calibraron la DBO (DBO<sub>fast</sub> y DBO<sub>slow</sub>) y el Oxígeno disuelto (OD) mediante un proceso de ajuste de las constantes cinéticas de la calidad del agua, mediante el ensayo y error. Se utilizaron como referencia los rangos reportados para constantes cinéticas reportadas de la literatura [8], [9]. Las constantes cinéticas que se tuvieron en cuenta fueron la tasa de hidrólisis de la DBO<sub>slow</sub>, la tasa de oxidación de la DBO<sub>slow</sub> y la DBO<sub>fast</sub> y la tasa de la demanda de oxígeno de los sedimentos (SOD). Adicionalmente, se tuvo en cuenta la Tasa de reaireación (K<sub>2</sub>).

### 2.7 Proceso de verificación del modelo

La verificación de la modelo realizada en este estudio se efectuó con la base de datos para la verificación, sin modificar las constantes cinéticas que se usaron como parámetros en el proceso de Calibración.

### 2.8 Simulación de escenarios futuros utilizando el modelo QUAL2Kw (v6) en el tramo de estudio

En este estudio se plantearon tres escenarios futuros proyectados al año 2015, dos de ellos tomados de la fase III del PMC [10] y el tercer escenario se planteó de acuerdo al riesgo frente al rompimiento del jarillón del río Cauca en la ciudad de Cali. En cada escenario se observaron las variaciones en la calidad del agua del río Cauca en el tramo de estudio, ante cambios realizados en las cargas contaminantes de DBO<sub>5</sub> vertidas por el sector del municipio de Cali. La base de datos que se utilizó correspondió a la de la calibración del modelo QUAL2Kw (v6). Los resultados consistieron en los gráficos de los perfiles de variación de los principales parámetros de calidad del agua del río.

#### 2.8.1 Escenario base año 2005 (E0): Estado de los sistemas de control de contaminación para las aguas residuales

El mayor aporte de carga orgánica DBO<sub>5</sub> a la cuenca del Río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro proviene de la ciudad de Cali. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cali (PTAR-Cañaveralejo) al año 2005 reporta una eficiencia media de remoción de DBO<sub>5</sub> del 40%, asociada al funcionamiento de una PTAR con tratamiento primario avanzado (TPA), para un caudal de 3.35 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, la PTAR-C tiene un caudal de diseño de 7.6 m<sup>3</sup>/s.

#### 2.8.2 Escenario 1 (E1)

El primer escenario a simular es el impacto en la calidad del agua del río Cauca al considerar el incremento del caudal de aguas residuales tratadas (si se pasará de 3.35 m<sup>3</sup>/s a 6.47 m<sup>3</sup>/s) en la PTAR Cañaveralejo. Por lo anterior, se asumió que el caudal tratado es 6.47 m<sup>3</sup>/s y la eficiencia media de remoción de DBO<sub>5</sub> del 40% está asociada al funcionamiento de una PTAR con tratamiento primario avanzado (TPA) correspondiente al año 2005.

#### 2.8.3 Escenario 2 (E2)

El objetivo de la PTAR Cañaveralejo es aumentar su eficiencia de remoción mediante la implementación de un tratamiento secundario. Por lo anterior, el segundo escenario a simular, es el impacto en la calidad del agua del río Cauca al considerar que el caudal tratado es 6.47 m<sup>3</sup>/s considerando las justificaciones del escenario 1 y aumentando la eficiencia media de remoción de DBO<sub>5</sub> al 80 %, asociada al funcionamiento de una PTAR con tratamiento secundario.

#### 2.8.4 Escenario 3 (E3)

El Jarillón de 17 kilómetros sobre el curso del río Cauca al pasar por la zona de la ciudad de Cali tenía el objetivo de evitar inundaciones sobre áreas que eran utilizadas para actividades agrícolas. Sin embargo, según investigaciones se han identificado varias situaciones de riesgo en el jarillón: la presencia de hormiga arriera (insecto que se caracteriza por hacer cavernas en la tierra), las tuberías ilegales de agua y alcantarillado instaladas informalmente por las personas asentadas en el jarillón y múltiples escombreras ilegales [11]. Por lo anterior, si en una fuerte temporada de lluvias la presión de las aguas del río Cauca logra romper el jarillón, podrían salir del servicio la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Puerto Mallarino y la PTAR de Cañaveralejo [12]. El tercer escenario simulado es el impacto en la calidad del agua del río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro al considerar el rompimiento del jarillón, que traería consigo el daño de la PTAR Cañaveralejo. Por lo tanto, se asumiría que no hay ningún tipo de remoción en la carga vertida por la PTAR en términos de DBO<sub>5</sub> al río Cauca.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Esquematación del modelo

Este proyecto, las fronteras externas del tramo corresponden a las estaciones Paso de la Balsa (Km 27.4) y Anacaro (Km 416.5). Se incluyeron en el modelo 84 fronteras internas, las cuales están representadas por 27 corrientes superficiales tributarias, 9 vertimientos de agua residuales domésticas, 11 de aguas residuales industriales y 37 extracciones de agua. Para este caso se representaron en total 43 sub-tramos y el espaciamiento varió para cada sub-tramo teniendo en cuenta que las características se mantuvieran relativamente constantes para facilitar la modelación. En la Figura 2 se muestra la esquematización usada para el modelo.

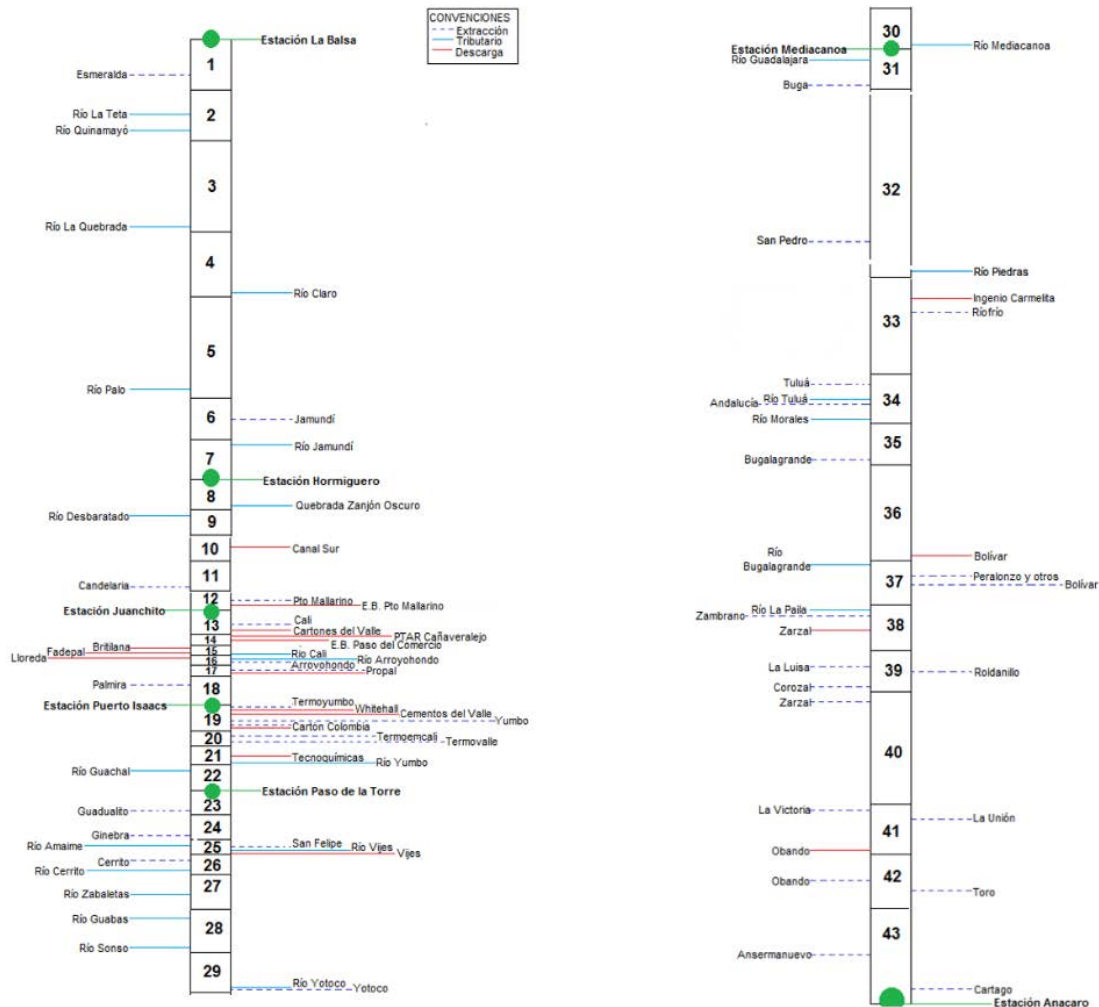


Figura 2. Esquematación del tramo en estudio del río Cauca

#### 3.2 Calibración del modelo QUAL2Kw (6) en el tramo de estudio

##### 3.2.1 Calibración del Caudal

Durante la calibración del componente hidráulico del QUAL2Kw (v6) se estableció un balance de caudales en los sub-tramos de modelación, considerando el caudal del río, los ríos tributarios, vertimientos y captaciones de agua y adicionalmente, se tuvo en cuenta el caudal de intercambio entre el río Cauca y el acuífero a lo largo del recorrido del río Cauca entre la estación La Balsa y La Virginia. La calibración de caudal se hace, primeramente, porque es de gran importancia para la hidrodinámica del río, puesto que determina todos los procesos de transporte de contaminantes en el tramo de estudio. En las Figuras 3, 4 y 5 se presentan los resultados finales de la calibración de los caudales solamente en las estaciones: La Balsa, Juanchito y Anacaro.

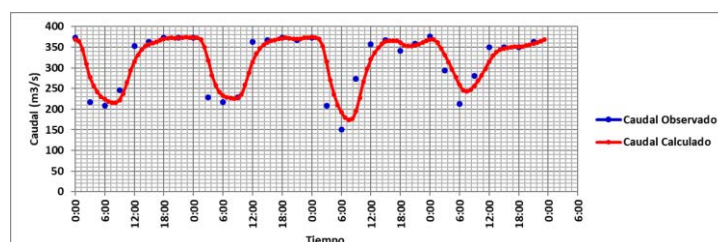
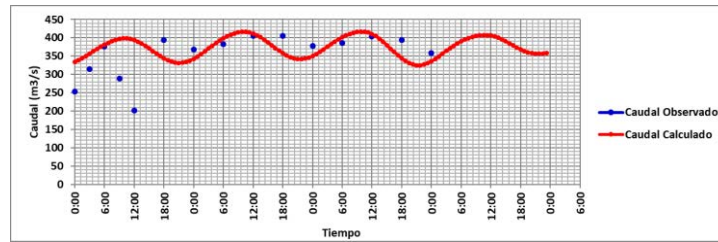
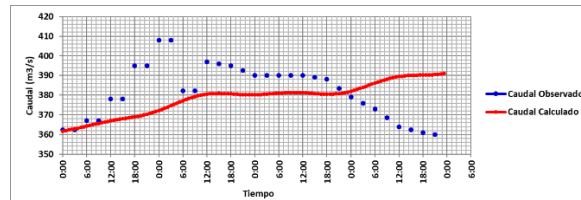


Figura 3. Calibración de caudal en la estación La Balsa



**Figura 4.** Calibración de caudal en la estación Juanchito

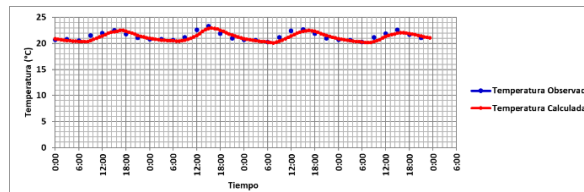


**Figura 5.** Calibración de caudal en la estación Anacaro

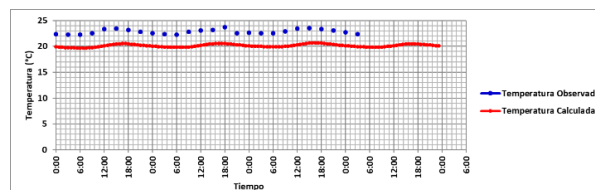
A partir de las Figuras 3, 4 y 5 se destaca que el modelo describe de manera adecuada el comportamiento del caudal en la estación Juanchito. Para la estación Anacaro no describe de manera adecuada el comportamiento del caudal. Para las estaciones la Balsa y Juanchito los valores máximos y mínimos de caudal tienen buen ajuste. Para la estación Anacaro el modelo tiende a subestimar los valores de caudal medidos en campo. La calibración del caudal en el modelo puede estar afectada por la dinámica que genera el embalse Salvajina, ubicado aguas arriba del tramo en estudio y adicionalmente el intercambio de caudal con los acuíferos en la zona.

### 3.2.2 Calibración de la temperatura del agua

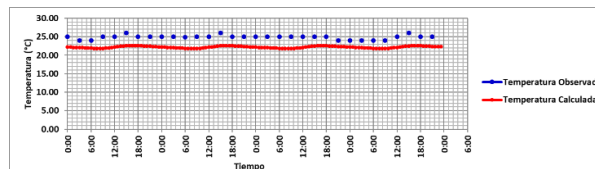
La temperatura fue el primer parámetro en ser calibrado considerando que los otros procesos simulados como la degradación de la materia orgánica y el cambio del oxígeno disuelto en el río están influenciados por este parámetro. En las Figuras 6, 7 y 8, se presentan los resultados finales de la calibración de la temperatura del agua de tres del total las estaciones modeladas.



**Figura 6.** Calibración de Temperatura del agua. Estación La Balsa



**Figura 7.** Calibración de Temperatura del agua. Estación Juanchito



**Figura 8.** Calibración de Temperatura del agua. Estación Anacaro

De acuerdo a las figuras anteriores, el modelo describe de manera adecuada el comportamiento de la temperatura en todas las estaciones. Para la estación Juanchito y Anacaro, el modelo tiende a subestimar los valores de temperatura medidos en campo. La calibración de la temperatura en el modelo puede estar afectada por usar la información meteorológica que no fue tomada en campo si no determinada a partir de la herramienta utilizada. Sin embargo, el modelo reproduce las tendencias de los datos observados en campo.

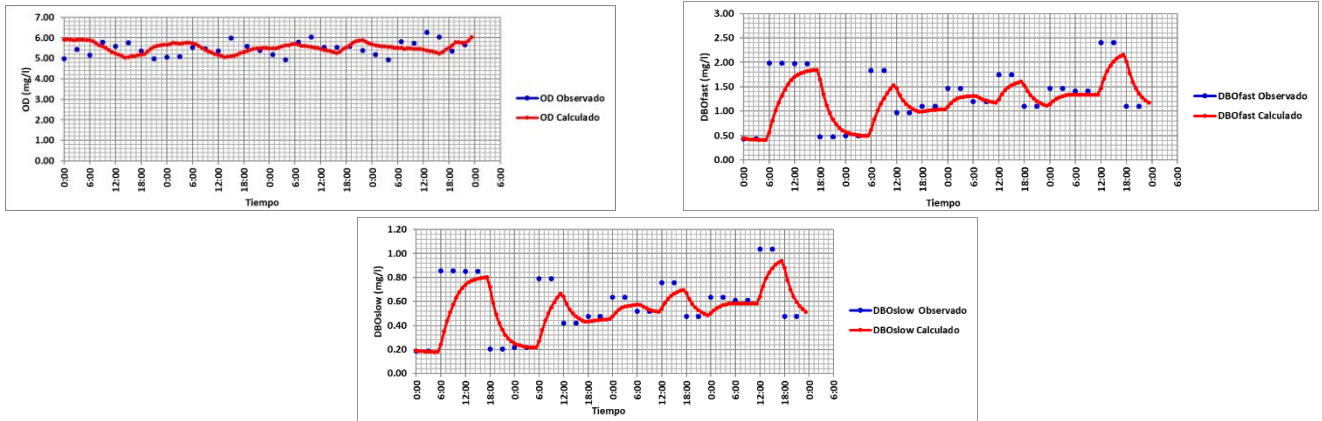
### 3.2.3 Calibración del OD y la DBO

Para la calibración del OD y la DBO (DBOfast y DBOslow), se utilizaron como parámetros de calibración los rangos reportados en la literatura de las constantes cinéticas, mediante el ensayo y error de valores de las constantes cinéticas en dichos rangos y realizando corridas del modelo. En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos de estos parámetros los cuales tuvieron el mejor ajuste de calibración.

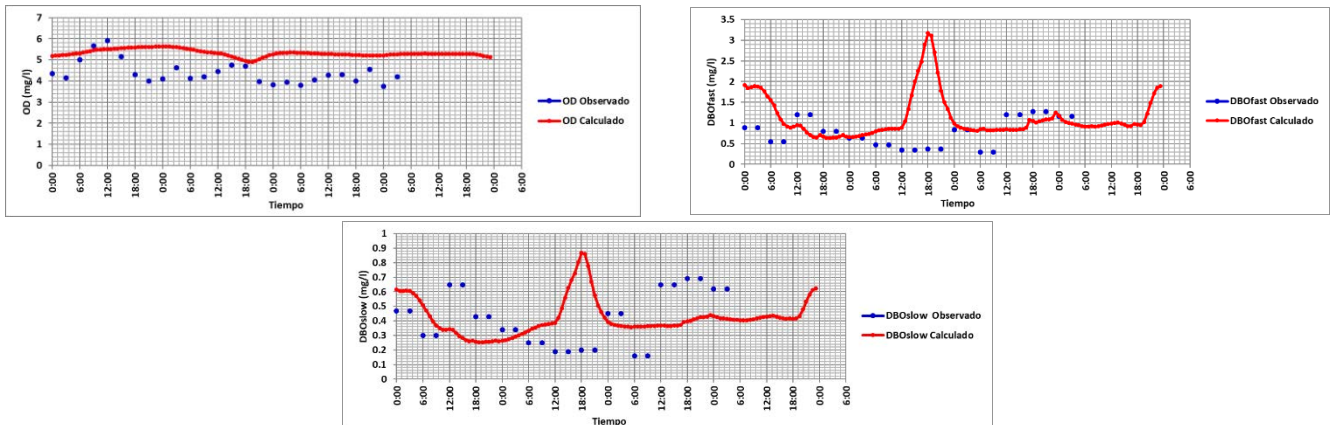
**Tabla 2.** Parámetros de calibración del modelo de calidad del agua en el tramo: La Balsa – Anacaro

Estaciones	Demanda béntica KSOD (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /día)	Tasa de oxidación DBOfast (d-1)	Tasa de oxidación DBOslow (d-1)	Tasa de hidrólisis DBOslow (d-1)
La Balsa	2.5	0.4	0.2	0.07
Hormiguero	2.5	0.6	0.5	0.4
Juanchito	3.0	1.2	0.8	0.1
Puerto Isaacs	3.1	1.8	0.04	0.04
Paso de la Torre	3.5	3.8	0.1	0.04
Mediacanoa	1.5	0.3	0.1	0.04
Anacaro	0.5	0.1	0.04	0.04

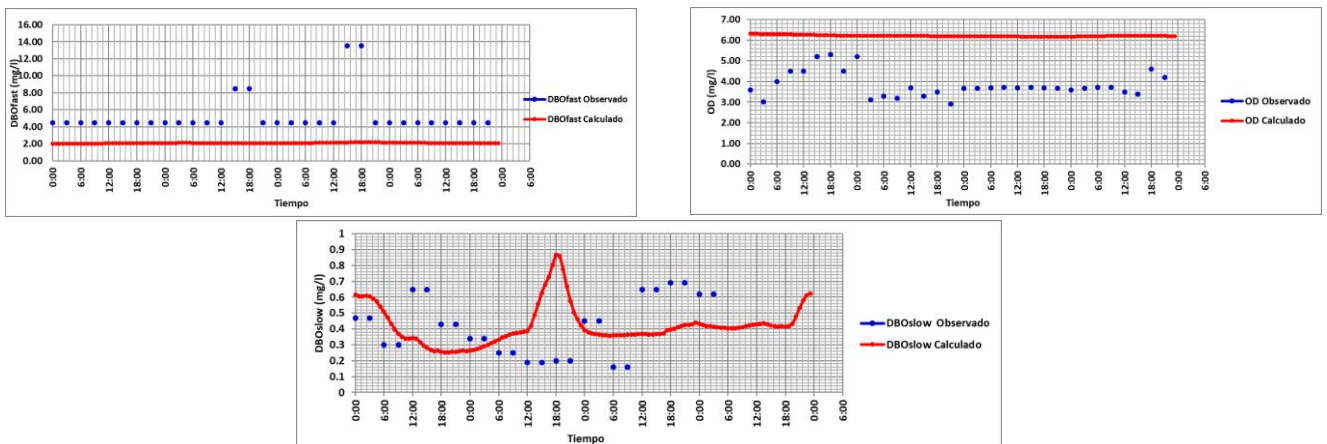
En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan los resultados de la calibración de las variables (OD y DBO) del modelo de calidad del agua del Río Cauca en las estaciones La balsa, Juanchito y Anacaro.



**Figura 9.** Calibración del modelo de calidad del agua del Río Cauca- Estación: La Balsa



**Figura 10.** Calibración del modelo de calidad del agua del Río Cauca. Estación: Juanchito



**Figura 11.** Calibración del modelo de calidad del agua del Río Cauca. Estación: Anacaro

De acuerdo a las figuras anteriores, para la estación La balsa, el modelo describe de manera adecuada el comportamiento de los parámetros OD y DBO. Para la estación Juanchito el modelo tiende a súper estimar los valores de OD y DBO medidos en campo. Para la estación Anacaro el modelo tiende a subestimar los valores de DBO medidos en campo. La calibración de los parámetros OD y DBO en el modelo puede estar afectada por la calibración del caudal, que determina el transporte de los contaminantes en el agua y también por la calibración de la temperatura que



determina la cinética de las reacciones y el oxígeno disuelto en el agua. Sin embargo, el modelo reproduce las tendencias de los datos observados en campo.

### 3.3 Verificación del modelo QUAL2Kw (6) en el tramo de estudio

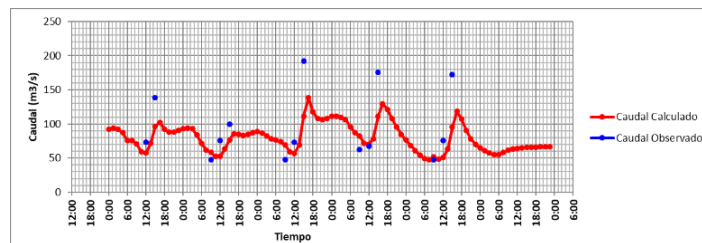
#### 3.3.1 Verificación de Caudal

Para la verificación del componente hidráulico, se llevó a cabo tomando como base Información Hidráulica de los sub-tramos de modelación de los coeficientes exponentes y coeficientes para las curvas velocidad-caudal y nivel-caudal reportada en la Tabla 3 y la información recolectada de los caudales para la base de datos con fin de verificación.

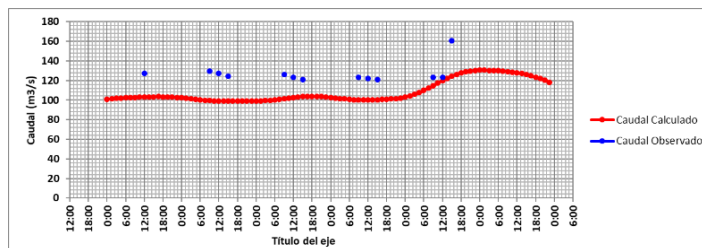
**Tabla 3.** Coeficientes y Exponentes de las curvas de calibración de velocidad (U) vs. Caudal (Q) y profundidad (H) vs. Caudal (Q) para algunas Estaciones de Medición sobre el Río Cauca

Estación	Relación U y Q	Relación H y Q	Relación U y Q	Relación H y Q
	$a$	$B$	$\alpha$	$\beta$
La Balsa	0.044	0.642	0.451	0.301
La Bolsa	0.061	0.473	0.222	0.500
Hormiguero	0.047	0.530	0.328	0.397
Juanchito	0.215	0.294	0.141	0.562
Mediacanoa	0.219	0.236	0.074	0.693
Guayabal	0.119	0.347	0.123	0.575
La Victoria	0.230	0.231	0.060	0.685
Anacaro	0.214	0.294	0.132	0.550

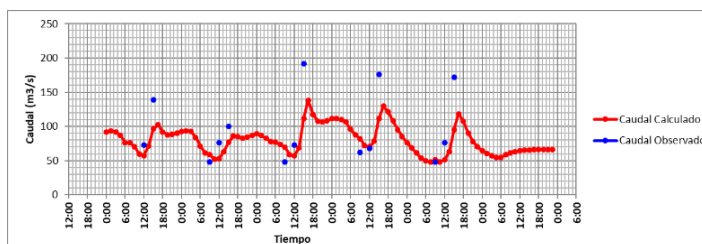
En las Figuras 12, 13 y 14 se presentan los resultados finales de la validación de los caudales solamente en las estaciones: La balsa, Mediacanoa y Anacaro, porque solo se tuvieron datos observados de caudal para esas estaciones. Como para las demás estaciones no se contaba con información de caudales, no fue posible realizar la verificación.



**Figura 12.** Verificación del caudal en la estación La Balsa



**Figura 13.** Verificación del caudal en la estación Mediacanoa



**Figura 14.** Verificación del caudal en la estación Anacaro

Se observan en las figuras que en general el modelo representa la tendencia de los datos observados. Sin embargo, los caudales máximos horarios no fueron bien representados. Esto puede estar determinado por las limitaciones en la información de campo de la verificación y por la variabilidad del caudal ocasionado por el funcionamiento del embalse Salvajina. Esta influencia disminuye en dirección aguas abajo, debido a que a lo largo del tramo existen diversas entradas y salidas de caudal relacionadas con los vertimientos, ríos tributarios y extracciones consideradas en este estudio. Además, un factor importante son los flujos río – acuífero que se tuvieron en cuenta, ya que pueden ejercer una influencia importante en el caudal a lo largo del tramo de estudio.

#### 3.3.2 Verificación de la temperatura del agua

Las Figuras 15 a 17 presentan los resultados finales de la validación de la temperatura del agua de las estaciones.

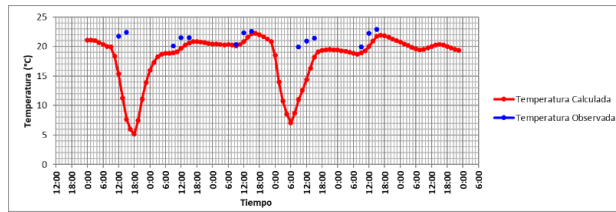


Figura 15. Verificación de la temperatura del agua. Estación: La Balsa

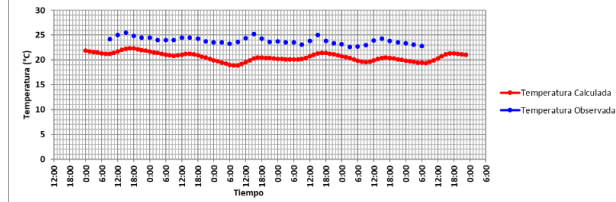


Figura 16. Verificación de la temperatura del agua. Estación: Juanchito

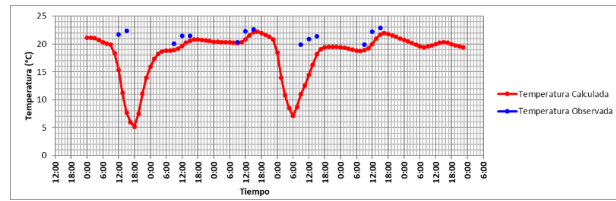


Figura 17. Verificación de la temperatura del agua. Estación: Anacaro

Al observar las figuras anteriores, el modelo describe el comportamiento de la temperatura, sin embargo, los valores están en diferente rango, esto puede ser resultado de usar la información meteorológica que no fue tomada en campo si no determinada a partir de la herramienta utilizada.

### 3.3.3 Verificación del modelo de calidad del agua

En las Figuras 18, 19 y 20 se presentan los resultados finales de la verificación de las variables (OD y DBO) del modelo de calidad del agua del Río Cauca en las estaciones La balsa, Juanchito y Anacaro. En términos generales, los valores calculados por el modelo siguen las tendencias mostradas por los datos y registros de campo, sin embargo, el ajuste no es óptimo para la DBOslow.

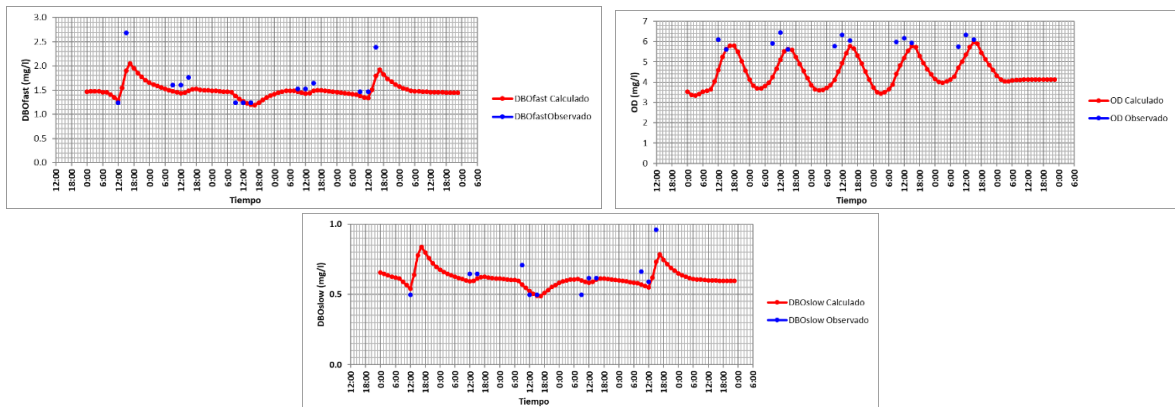


Figura 18. Verificación del modelo de calidad del agua del Río Cauca. Estación: La Balsa

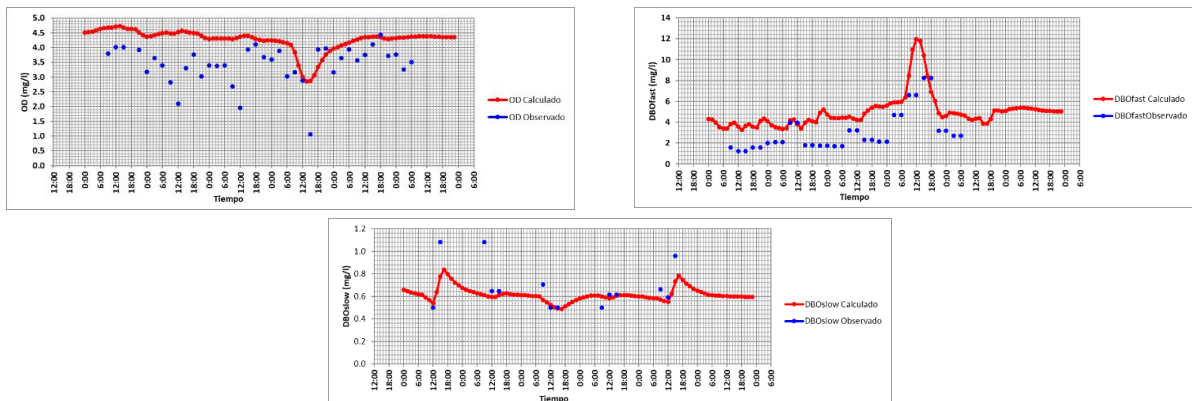


Figura 19. Verificación del modelo de calidad del agua del Río Cauca. Estación: Juanchito

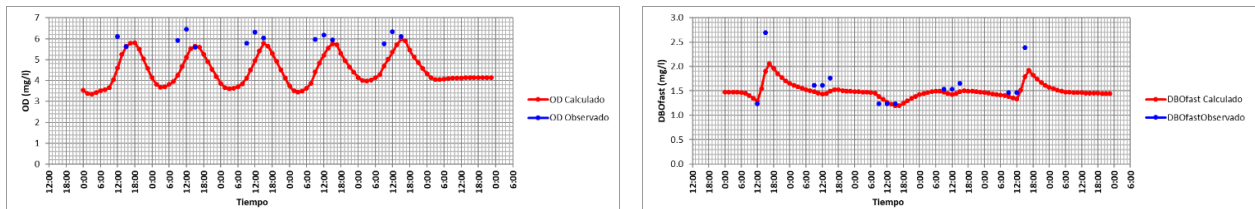


Figura 20. Verificación del modelo de calidad del agua del Río Cauca. Estación: Anacaro

### 3.4 Simulación de escenarios futuros utilizando el modelo QUAL2Kw (v6)

Con base en la información recopilada y procesada para cada uno de los 3 escenarios se realizaron las simulaciones numéricas utilizando el modelo matemático QUAL2Kw (v6). Los resultados de la variación de los parámetros OD y DBO<sub>5</sub> a lo largo del tramo en estudio para cada uno de los escenarios planteados al año 2015 se presentan en las Figuras 21 y 22. Adicionalmente se incluyó en el gráfico el escenario base (E0) para el año 2005, para determinar la variación de cada uno de los escenarios respecto a la condición inicial. En las Figuras 21 y 22 se observa que para el tramo desde la estación La Balsa a Vijes se presenta las mejores condiciones de calidad del agua de todo el tramo de estudio. Los niveles de oxígeno disuelto disminuyen ligeramente, pasando de 6 mg/l en La Balsa a 5 mg/l en paso de la torre. Sin embargo, en el tramo después de Mediacanoa el río Cauca ha recibido la contaminación de materia orgánica proveniente principalmente de aguas residuales y aguas lluvias del sistema de alcantarillado de la ciudad de Cali, los vertimientos de la zona industrial de Acopi – Yumbo, por lo tanto, se observa una disminución del oxígeno disuelto y un aumento en la DBO<sub>5</sub>.

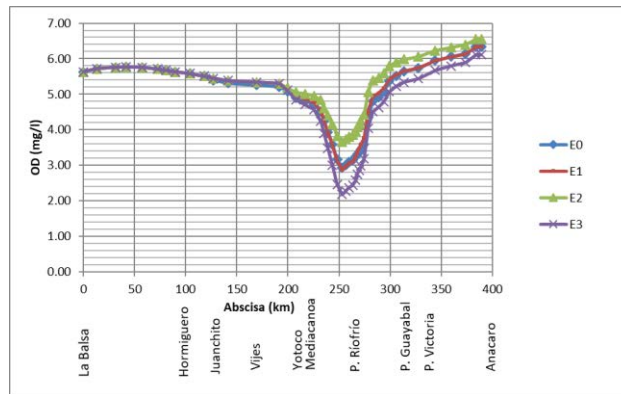


Figura 21. Variación del OD a lo largo del Río Cauca para los escenarios E0, E1, E2 y E3. Tramo: La Balsa – Anacaro

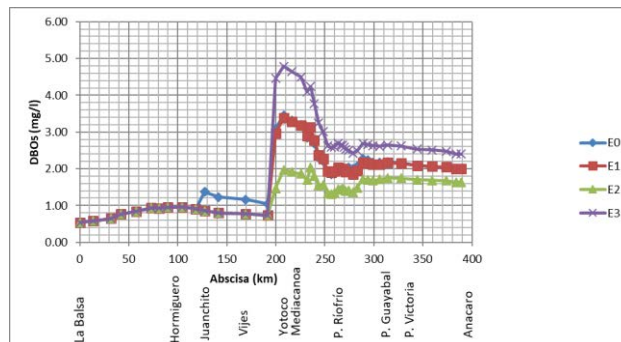


Figura 22. Variación del DBO<sub>5</sub> a lo largo del Río Cauca para los escenarios E0, E1, E2 y E3. Tramo: La Balsa – Anacaro

A partir de la estación Riofrío se observa una recuperación de la calidad del agua del río Cauca. Los niveles de OD se incrementan en forma general desde valores de 2 mg/l en la estación Mediacanoa hasta 6.0 mg/l en la estación Anacaro. La recuperación de la calidad del agua del Río Cauca en este tramo está relacionada con la menor cantidad de carga en términos de DBO<sub>5</sub> vertida en comparación con el tramo que comprende los vertimientos de la ciudad de Cali y la zona industrial de yumbo, así como también a los aportes de caudal de los tributarios con calidad aceptable que incrementan la dilución de la carga contaminante. En las figuras también se observa que las concentraciones de OD y DBO<sub>5</sub> en todo el tramo son muy similares entre escenarios, sin embargo, el escenario 2 que propone una remoción del 80% de la carga de DBO<sub>5</sub> y el aumento del caudal tratado por la PTAR muestra que tiene un mejor comportamiento del OD. Por el contrario, el escenario 3 que propone el comportamiento de la calidad del río cauca frente al rompimiento del jarillón, indica una disminución del oxígeno disuelto de 2 mg/l frente al escenario 2.

## 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de grado, inicialmente se efectuó una caracterización hidrodinámica y de la calidad del agua del Río Cauca y sus tributarios, a partir de experiencias y estudios relacionados con la modelación de la calidad del

agua del río Cauca, tales como el proyecto de Modelación del río Cauca (PMC), con el propósito de aplicar un sistema de modelación matemática gratuito denominado QUAL2Kw (v6), que permitiera entender la dinámica de los procesos hidráulicos y fisicoquímicos que afectan la calidad del agua del río Cauca en el tramo La Balsa-Anacaro, correspondiente al Departamento del Valle del Cauca.

Se concluyó que el modelo unidimensional QUAL2Kw (v6) es ser una herramienta asequible, amigable y sencilla de operar. Adicionalmente, el modelo tiene una interfaz gráfica basada en macros de Excel, en donde facilita el ingreso de datos y la generación y presentación de resultados para el procesamiento de los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones.

Los resultados obtenidos durante la aplicación del modelo de simulación de la calidad del agua QUAL2Kw (v6) en el río Cauca indican que el modelo permite reproducir en forma aceptable la variación espacial y temporal de las variables de estado Caudal, Temperatura, Oxígeno Disuelto y DBO a lo largo del tramo en estudio y en condiciones climáticas diferentes (invierno y verano). Esto puede estar relacionado a que existieron limitaciones en la información de campo de la verificación. Sin embargo, el modelo representa la tendencia de los datos observados.

Respecto a la calibración de caudales, los flujos de intercambio río – acuífero que se tuvieron en cuenta en este estudio, ejercieron una influencia importante en características hidráulicas como el caudal a lo largo del tramo de estudio. Adicionalmente, otro factor que puede estar relacionado con la dinámica del caudal es el embalse Salvajina, ubicado aguas arriba del tramo de estudio.

En la calibración de la temperatura, se observa que el modelo no describe adecuadamente este parámetro, que determina otros procesos simulados como la degradación de la materia orgánica y el cambio del oxígeno disuelto en el río. Esto está relacionado con los valores meteorológicos introducidos, los cuales tuvieron que hallarse por valores históricos y no por valores tomados in-situ en el periodo de las campañas con propósito de calibración y verificación.

Además, se dejaron los valores por omisión que trae el modelo para los parámetros relacionados con la temperatura, lo cual también afectó la calibración de ese parámetro.

El modelo calcula internamente las tasas de reaireación. Cabe resaltar que las tasas de reaireación varían con la velocidad y la profundidad del río, que se determinan a partir de la calibración del caudal. En este caso, la calibración del caudal fue poco aceptable por lo que estos valores pueden afectar la dinámica del oxígeno disuelto en el río.

Durante las dos campañas realizadas en los años 2003 y 2005 utilizadas para la calibración y verificación del modelo QUAL2Kw (v6), no se registró información de los compuestos nitrogenados, por lo anterior, el balance de oxígeno realizado por el modelo no tiene en cuenta los procesos asociados a la demanda de oxígeno causada por la degradación de la materia orgánica nitrogenada. Asimismo, no se incluye información de los fenómenos de fotosíntesis y respiración en las estaciones de monitoreo sobre el Río Cauca, que también generan demanda de oxígeno en el tramo de estudio.

El modelo QUAL2Kw (v6) puede ser aplicado en diversos escenarios, obteniendo en cada uno de ellos la condición del río bajo las circunstancias específicas simuladas. La precisión de los resultados obtenidos está en función del nivel de calibración del modelo, la información disponible y el grado de aproximación al escenario a modelar. En este caso, se modelaron de manera aceptable escenarios futuros.

El modelo QUAL2Kw (v6) tiene muchas herramientas que pueden ser aprovechadas si se realiza una campaña de muestreo adecuada, acorde con los procesos fisicoquímicos y microbiológicos con potencial de ser modelados. Entre los componentes que incluye el modelo se encuentran: la temperatura, la conductividad, los sólidos inorgánicos, el pH, la demanda bioquímica carbonácea, la demanda de oxígeno del sedimento, el oxígeno disuelto, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato, fósforo orgánico e inorgánico, nitrógeno total, fósforo total, detritos, fitoplancton y algas del fondo.

El presente trabajo se enmarca en las actividades del Semillero de Investigación en Gestión Integrada del Recurso Hídrico de la Universidad Autónoma de Occidente, en la línea de estrategias para la prevención y el control de la contaminación y la restauración ecológica del recurso hídrico. Dicho Semillero complementa las actividades del grupo de investigación PAI+ (Grupo de Investigación en Modelado, Análisis y Simulación de Procesos Ambientales e Industriales) de la misma Universidad. Como futuro trabajo de esta investigación, se plantea la optimización del modelo de calidad del agua QUAL2Kw (v6) en el río Cauca mediante una evaluación más detallada y el acople de la modelación de ríos tributarios al río Cauca (aguas arriba de la desembocadura) con este mismo modelo. Este futuro trabajo permitirá comparar los resultados de la calibración del modelo MIKE 11 obtenidos en el Proyecto PMC [4], el cual es un modelo comercial costoso y más robusto en términos hidrodinámicos, con los resultados obtenidos con el modelo QUAL2Kw (v6), el cual es un modelo gratuito con ciertas limitaciones en el contexto de la representación hidrodinámica pero que puede representar de forma adecuada la calidad del agua del río Cauca.

## REFERENCIAS

- [1] Global Water Partnership (2011). [¿Qué es la GIRH?](#) En línea [May 2016].
- [2] Holguin, J. (2013). Development and application of an integrated ecological modelling framework to analyze the impact of wastewater discharges on the ecological water quality of rivers. *Environmental Modelling & Software* 48, 27-36.
- [3] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2000). Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia. Proyecto de Modelación del Río Cauca. PMC fase I.
- [4] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2000). Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia. Proyecto de Modelación del Río Cauca. – PMC.
- [5] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2005). Fichas de estaciones hidrométricas operadas por CVC sobre el río Cauca en el tramo Pan de azúcar – Anacaro. Proyecto de Modelación del Río Cauca. – PMC Fase II.
- [6] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007). Fichas técnicas de estaciones de monitoreo de calidad del agua en el río Cauca y sus tributarios tramo Salvajina - La Virginia. Proyecto de Modelación del río Cauca. – PMC fase III.
- [7] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2005). Determinación y análisis comparativo de curvas de calibración nivel – caudal aplicando diferentes metodologías en las estaciones hidrométricas del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia. Proyecto de Modelación del Río Cauca. – PMC fase II.
- [8] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007). Estimación experimental de las constantes cinéticas de la calidad del agua del río cauca en el tramo la balsa – Anacaro. Proyecto de Modelación del Río Cauca. – PMC Fase III.
- [9] Kannel, P. et al. (2007). Application of automated QUAL2Kw (v6) for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling* 202(3), 503-517.
- [10] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007). Modelación de escenarios para definir los planes de control de contaminación en la cuenca del río cauca Tramo La Balsa – Anacaro. Proyecto de Modelación del Río Cauca. – PMC fase III.
- [11] El País (2015). [Infografía: Los detalles de la 'cirugía' que le harán al jarillón del río Cauca](#). En línea [Apr 2016].
- [12] El País (sf). [Jarillón la amenaza silenciosa de Cali](#). En línea [Apr 2016].

# Propuesta de modelo de seguimiento y control basado en PMBOK para la gerencia de proyectos SCRUM

Marisella Restrepo P.<sup>1</sup>

Adriana Xiomara R.<sup>2</sup>

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín – Antioquia

En la mayoría de los proyectos gestionados con SCRUM no se tiene un seguimiento y control por parte de los patrocinadores y gerentes quienes desean conocer el estado del proyecto en cuanto a los ítems principales, tales como, costos, tiempo y recursos. Este capítulo presenta la construcción de un modelo que incluya las técnicas y herramientas utilizadas en la gestión de proyectos según el PMBOK en el marco de trabajo SCRUM, buscando incorporar al marco los elementos que sean necesarios para cubrir las necesidades que tienen los patrocinadores de conocer el progreso de los proyectos que gestionan con SCRUM.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según Beck et al. [1], SCRUM es un marco de trabajo para el desarrollo ágil de software diseñado para lograr la colaboración eficaz de equipos, el cual emplea un conjunto de reglas y artefactos definiendo roles que generan la estructura necesaria para su correcto funcionamiento. SCRUM utiliza un enfoque incremental que tiene como fundamento la teoría de control empírico de procesos, además de que es una forma de gestionar proyectos en la que la agilidad, flexibilidad y la incertidumbre son los elementos con los que se trabaja en el día a día [2]. La gestión de proyectos según Canós [3], por el contrario, está basada en la planeación, definición del alcance y el seguimiento y control constante de los proyectos, teniendo un porcentaje de flexibilidad e incertidumbre muy bajo.

En SCRUM también se tienen unos actores externos quienes son los patrocinadores del proyecto, que otorgan el dinero que se requiere para la ejecución del mismo. Por lo que constantemente requieren conocer los tiempos y costos con los que se desarrollará y se está llevando el proyecto cuando se encuentra en la etapa de ejecución, ítems que en la metodología SCRUM no han sido estimados y no son controlados dentro del proceso de desarrollo. En este capítulo se propone incluir las técnicas y herramientas utilizadas en la gestión de proyectos según el PMBOK en el marco de trabajo SCRUM, buscando incorporar al marco los elementos que sean necesarios para cubrir las necesidades que tienen los patrocinadores de conocer el progreso de los proyectos que gestionan con SCRUM.

Este trabajo se encuentra organizado en cuatro secciones, la primera corresponde al marco conceptual que presenta el área de investigación que abarca este trabajo, la segunda es la revisión de literatura la cual incluye los trabajos que se han realizado en este campo de conocimiento, la tercera presenta la propuesta que se plantea desarrollar y por último se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Gestión de proyectos software

Según Lledó et al. [4], un proyecto es un desafío temporal que se enfrenta para crear un único producto o servicio. Todo proyecto tiene un resultado deseado, una fecha límite y un presupuesto limitado. Como resultado del proyecto se obtiene un único producto o servicio que no se ha realizado con anterioridad. Las siguientes son las áreas del conocimiento de la gestión de proyectos planteadas en PMBOK:

- Integración
- Alcance
- Tiempo
- Costos
- Calidad
- Recursos Humanos
- Comunicaciones
- Riesgos
- Adquisiciones
- Interesados

En general, los proyectos se dividen en distintas fases con el objetivo de hacer más eficiente la administración y el control de los mismos, a estas fases en su conjunto se las denomina ciclo de vida del proyecto. Las fases que comprende la gestión de proyectos son [5]:

---

<sup>1</sup> marisella\_restrepo82103@elpoli.edu.co

<sup>2</sup> axreyes@elpoli.edu.co

1. *Inicio del proyecto*: El proceso de iniciación es la autorización formal para el comienzo de un nuevo proyecto o para pasar a la fase siguiente en un proyecto en marcha. Los proyectos se originan a partir de un problema o de una oportunidad de mercado ocasionada por cuestiones de oferta, demanda, cambios tecnológicos, modificaciones en la legislación o cualquier otra necesidad.
2. *Planificación del proyecto*: La planificación del proyecto debería servir para responder a las siguientes preguntas:
  - ¿Qué se debe hacer?
  - ¿Cómo se hará?
  - ¿Quién lo hará?
  - ¿Cuándo se hará?
  - ¿Cuánto costará?Los ítems que debería incluir por escrito un plan de proyecto son: Definición del problema, misión, objetivos, necesidades del cliente traducidas en productos o servicios, alcance del proyecto (justificación, descripción del producto, entregables y objetivos), requerimientos contractuales, estructura de división del trabajo, agendas y cronogramas de trabajo, recursos necesarios (personas, equipamiento, materiales, servicios de apoyo), análisis de riesgo y sistemas de control [6].
3. *Ejecución del proyecto*: Integración de todos los recursos para llevar a cabo el plan. Se implementan las actividades definidas en el plan a fin de alcanzar los objetivos del proyecto. En la etapa de ejecución del proyecto, se implementa el plan y se consume la mayoría del presupuesto del proyecto.
4. *Control del proyecto*: A medida que se obtienen los resultados parciales del plan, éstos deben monitorearse continuamente en relación con la línea base del proyecto. Luego, deberán corregirse aquellos desvíos entre lo efectivamente realizado y lo planificado, para que el resultado de la ejecución del proyecto sea coherente con el plan del proyecto. La clave para un control de cambios efectivo es medir el progreso real, compararlo con el planeado y tomar de inmediato las acciones correctivas necesarias.
5. *Cierre del proyecto*: En la etapa de cierre se deberán presentar las conclusiones, ya sean malas o buenas. Tanto una fase cualquiera como la totalidad de un proyecto necesitan un cierre. Los proyectos que no se cierran de manera formal pueden continuar consumiendo recursos escasos que se requieren en otra parte. La mayoría de los proyectos deben terminar tan pronto como se alcancen las metas o se llegue a un punto en el que se reconozca la imposibilidad de tener éxito.

## 2.2 Modelo SCRUM

SCRUM es un proceso ágil y liviano que sirve para administrar y controlar el desarrollo de software. El desarrollo se realiza de forma iterativa e incremental (una iteración es un ciclo corto de construcción repetitivo). Cada ciclo o iteración termina con una pieza de software ejecutable que incorpora una nueva funcionalidad. Las iteraciones en general tienen una duración entre 2 y 4 semanas.

SCRUM se focaliza en priorizar el trabajo en función del valor que tenga para el negocio, maximizando la utilidad de lo que se construye y el retorno de inversión. Está diseñado especialmente para adaptarse a los cambios en los requerimientos, por ejemplo, en un mercado de alta competitividad. Los requerimientos y las prioridades se revisan y ajustan durante el proyecto en intervalos muy cortos y regulares. De esta forma se puede adaptar en tiempo real el producto que se está construyendo a las necesidades del cliente. Se busca entregar software que realmente resuelva las necesidades, aumentando la satisfacción del cliente.

En Scrum, el equipo se focaliza en una única cosa: construir software de calidad. Por el otro lado, la gestión de un proyecto Scrum se focaliza en definir cuáles son las características que debe tener el producto a construir (qué construir, qué no y en qué orden) y en remover cualquier obstáculo que pudiera entorpecer la tarea del equipo de desarrollo. Se busca que los equipos sean lo más efectivos y productivos posible [7].

Scrum tiene un conjunto de reglas y está basado en los principios de inspección continua, adaptación, auto-gestión e innovación. El cliente se entusiasma y se compromete con el proyecto dado que ve crecer el producto iteración a iteración y encuentra las herramientas para alinear el desarrollo con los objetivos de negocio de su empresa. [8, 9]. Por otro lado, los desarrolladores encuentran un ámbito propicio para desarrollar sus capacidades profesionales y esto resulta en un incremento en la motivación de los integrantes del equipo.

## 3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 3.1 Gestión de proyectos de software

Torres [10] presenta un trabajo en el cual se integra la metodología PMBOK (Project Management Body of Knowledge) con RUP (Proceso Unificado de Desarrollo de Software), buscando asegurar la implementación de mejores prácticas, tanto en la ejecución de las actividades del proyecto como en la gestión y supervisión de las mismas. Después de generar la integración, en el trabajo, se plantea un caso de éxito en un proyecto de desarrollo de software en una empresa del sector financiero, gestionando con efectividad el proceso de desarrollo de Software con los estándares

PMI. Se realiza una comparación entre las dos metodologías para finalmente acoplar a la metodología RUP los elementos que le hacen falta para tener un seguimiento y control adecuado para los proyectos de software. Obteniendo como conclusión que aplicando la metodología PMBOK y RUP se puede gerenciar eficientemente un proyecto de desarrollo de software en el sector financiero. En el capítulo se exponen los resultados del proyecto anteriormente planteado al integrar PMBOK con RUP, pero no se exponen numéricamente los resultados al utilizar solamente RUP, por lo que no se tiene un punto de partida para confirmar si se tuvo una mejoría.

Díaz et al. [11] plantean la identificación de los conceptos centrales de la integración en la gerencia de proyectos, con base en PMBOK, ISO21500, PRINCE, IPMA.ITL, SCRUM. Concluye que las organizaciones que utilizan herramientas de gestión, tienen un control de los costos en el proyecto, generan un mayor cumplimiento con el cronograma de acuerdo al trabajo planificado, tienen una mayor calidad del producto final y una aplicación de las buenas prácticas de desarrollo de software. Se encontró que la mayoría de las organizaciones independientemente de cual sea el estándar utilizado para la gestión de proyectos aplicaron los grupos de herramientas encontradas para la integración en todas las etapas de la vida útil de los proyectos. Este al ser un trabajo netamente de revisión, explica claramente cuáles herramientas son utilizadas en la gestión de proyectos, más no muestra un caso práctico en el que se demuestre que la utilización de dichas herramientas mejora el desempeño en la ejecución de los proyectos.

Salazar et al. [12] evidencian como los proyectos de software no han logrado afinar la gestión de costos, lo que ha generado que un alto porcentaje de estos no sea desarrollado acorde a las condiciones iniciales planeadas, lo que genera una afectación en una de las aristas principales las cuales son tiempo, alcance y presupuesto. Concluyen que la construcción de software es una ciencia a la cual se le deben estar haciendo revisiones constantes para tener el control suficiente de las variables mencionadas anteriormente. Evidencian que los procesos de desarrollo de software no han logrado afinar el proceso de costos lo cual ha generado que un gran porcentaje de estos no logren desarrollarse, pero no se propone una forma de mejorar esta debilidad en la gestión de proyectos.

Ramírez [13] enseña un subconjunto de buenas prácticas tanto del proceso de desarrollo de software a nivel individual con PSP (Personal Software Process) como la guía para la gerencia de proyectos definida en el marco de referencia de PMBOK® (Project Management Body of Knowledge) para ayudar a gestionar con efectividad un proceso de desarrollo de software con estándares y guías, estas buenas prácticas son aplicadas en el desarrollo de un sistema experto en un entorno web para el diagnóstico e identificación de enfermedades profesionales. El marco propuesto necesita más proyectos de aplicación para evaluar y determinar su verdadera utilidad.

Muñoz [14] expone la adaptación de los fundamentos de la dirección de proyectos especificados en la guía del PMBOK para aplicarlos a la metodología de desarrollo de software OpenUP. Como resultado de este trabajo se presenta un modelo integrado con herramientas e instrumentos de documentación que permite llevar a cabo la gestión de proyectos de desarrollo de software. Este modelo aún no ha sido probado en un entorno real, por lo que es importante darle seguimiento a su implementación, con el fin de poder refinar el modelo, tanto en sus procedimientos como en sus plantillas.

Parra [15] presenta una investigación sobre la implementación de técnicas de gestión en las áreas de la gerencia de proyectos en organizaciones a partir de una revisión bibliográfica detallada, como también resaltar la importancia de la utilización de estas herramientas, generando una base de datos con literatura especializada. Como conclusión final se determina que para la correcta integración en la planeación y seguimiento de proyectos es recomendable utilizar más de una técnica, en lo posible, que se complementen entre sí. La utilización de una sola técnica no garantiza la integración de los diversos procesos y actividades en la planeación y seguimientos de los proyectos.

Najera [16], desarrolla un modelo integrado de procesos para la gestión de proyectos diseñados según PMBOK®, homologable con ISO 21.500:2.012 y compatible con PRINCE2®. MIGP: Modelo de Gestión Integrada de Proyectos. El método propuesto puede ser aplicado tanto considerando desde un punto de vista sectorial como desde una óptica de un proyecto más concreto. Como trabajo futuro se propone la elaboración y/o modificación de los procesos del MGIP para incluir metodologías tales como SCRUM.

Gutiérrez et al. [17] plantean un estudio enfocado a la validación de los procesos para el seguimiento y control en los proyectos de investigación, utilizando el formalismo que prevalecen las redes de Petri. Se demuestra que, al haber validado y asegurado el buen funcionamiento del modelo actual, también se han logrado desarrollar competencias en los alumnos, como investigar, leer, redactar, mejorar la expresión oral y escrita, tanto en el idioma español, como en inglés. Como trabajo futuro, se plantea la culminación de un marco de trabajo, que, con base en la combinación de conocimientos de otros métodos logre la automatización del proceso.

Halle et al. [18] postulan situaciones equívocas como fuente de dilemas que impiden a las partes interesadas lograr una adecuada evaluación y toma de decisiones útiles. Resalta la importancia de disminuir las situaciones equívocas cuando se trata de proyectos IS / IT a gran escala para evitar la ocurrencia de eventos raros e impredecibles durante las ejecuciones del proyecto. La limitación implícita en este estudio se refiere a la forma en que se recopilaban los datos, lo que hace que los resultados no pueden ser generalizables. La muestra relativamente pequeña en el análisis de grupos múltiples puede obstaculizar la computación y el resultado también. Por lo tanto, la necesidad de obtener una muestra más grande en estudios posteriores es fundamental para poder generalizar los hallazgos. Además, también se justifican exámenes adicionales en profundidad sobre cada problema significativo.



Oliveros [19] formula los lineamientos generales para el control de los costos en los proyectos de la Unidad de Asesoría, Proyectos e Innovación Tecnológica de la Universidad de Los Andes (UAPIT-ULA), Venezuela. Estableciendo dos tipos de lineamientos generales: un primer grupo relacionado con cuestiones técnicas y de diseño; y un segundo grupo que hace referencia a aspectos relacionados con elementos organizativos y de funcionamiento. En lo referente a la utilización de las mejores prácticas del Project Management Institute en el Control de Costos en los proyectos de la UAPIT, se encontró que no se emplean, bajo ninguna circunstancia, las Entradas, Herramientas y Técnicas, y las Salidas en dicho control.

Caballero et al. [20] presentan un modelo que promueve la gestión de los proyectos de sistemas de los negocios, estandarizar procesos y certificar el cumplimiento y la entrega de productos, alineado con la demanda de una empresa de Telecomunicaciones bajo el enfoque metodológico PMI – PMBOK.

Presedo et al. [21] establecen un marco de selección de métricas para controlar la gestión del proyecto de desarrollo software y propone un conjunto inicial de indicadores. La validez de la selección propuesta se evalúa mediante un estudio realizado en varias empresas del País Vasco y se presentan las conclusiones alcanzadas. A la vista de los resultados del estudio, es evidente que la mayoría de los indicadores sobre los que se preguntó a las empresas están siendo controlados actualmente, con mayor o menor frecuencia lo que respalda la validez de las métricas propuestas. El trabajo futuro consistirá en refinar esta selección inicial y utilizarla posteriormente en temas de control de proyectos software mediante representaciones visuales y simulación.

Carreño et al. [22], elaboran una guía de auditoría a la gerencia de proyectos de desarrollo de software, aplicable a proyectos cuya gerencia se efectúe siguiendo las pautas establecidas en el cuerpo de conocimientos PMBOK® Guide 5ta Edición, específicamente para las áreas de alcance, tiempo y costo. La guía de auditoría constituye una herramienta de construcción gradual, que puede ser complementada y actualizada permanentemente, atendiendo las condiciones cambiantes que inciden en cualquier proyecto. Se recomienda ampliar el proceso de investigación incorporando análisis cuantitativo de riesgos y planes de tratamiento que se acondicionen a los diferentes tipos de proyectos de desarrollo de software y de TI.

### **3.2 Implementación de metodologías ágiles para proyectos software**

Balaguera [23] propone el uso de metodologías ágiles para el desarrollo de aplicaciones en dispositivos móviles tales como Extreme Programming (XP), SCRUM y Test Driven Development (TDD). Plantea la importancia de utilizar las metodologías ágiles debido a que el desarrollo de aplicaciones móviles está en un constante cambio, además de que se tiene una tendencia a desarrollar en cortos lapsos de tiempo teniendo en cuenta la gran rapidez con que van cambiando las versiones de los sistemas operativos (SO) móviles, la aparición de nuevas prestaciones de hardware, la reñida competencia de las empresas y las comunidades de desarrollo por apropiarse del mercado. Expone el uso de metodologías ágiles únicamente para proyectos con cambios en el alcance y de corta duración.

Navarro et al. [24] presentan la investigación de las posibles estrategias de integración entre Arquitectura de Software y Metodologías Ágiles, sin dejar de lado las consideraciones de riesgo y costos asociados a la integración pretendida. Se presenta un avance de la exploración, comparación y selección bajo distintos criterios de dos metodologías ágiles, con el propósito de incluir actividades de diseño de arquitecturas de software en estas. Como trabajo futuro se propone la aplicación de la integración de la arquitectura de software con las metodologías ágiles en pequeñas organizaciones de desarrollo de software.

Hoyos [25] busca determinar un método para la identificación de problemas en la etapa previa de requerimientos en proyectos de software que usan metodologías y *frameworks* ágiles, dado que identificó que los usuarios no tienen claro el problema a la hora de desarrollar las historias de usuario que se plantean en el *backlog*, por ejemplo, para la metodología SCRUM. Plantea la importancia de tener a las diferentes áreas involucradas en el proceso de generación de historias de usuario para tener una óptica transversal en la especificación del problema. Como trabajo futuro propone la implementación del método definido en este trabajo, en diversos proyectos de desarrollo de software ágil para determinar los resultados finales y su contribución en estos.

Britto [26] presenta la construcción de un instrumento de comparación que toma como referencia las prácticas específicas de CMMI, estableciendo un marco común sobre el cual se pueden comparar metodologías ágiles y procesos de desarrollo de software. Evalúan y comparan SCRUM, XP e Iconix y un proceso de desarrollo de software de una empresa del eje cafetero colombiano, demostrando la funcionalidad del instrumento como método de evaluación y validación. Es un estudio de gran cubrimiento debido a que aplica los 5 niveles de CMMI con 3 prácticas ágiles, teniendo en cuenta que la mayoría de trabajos utilizan la comparación con 2 prácticas. Después de mapear los puntos de vista de diferentes autores en el análisis de las mismas prácticas puede observarse diferencias entre los puntos de vista, lo que muestra que es tal vez imposible no tener cierto nivel de subjetividad al realizar análisis de estas características.

Montoya [27] pretende evidenciar un estudio de las metodologías más utilizadas en el desarrollo de software mostrando sus características y diferencias, además de mostrar cuáles son los métodos de programación ágiles más destacados en el medio que cumplen con mayor satisfacción las necesidades del cliente y con la calidad de software esperada. Se analizan las metodologías XP, Crystal, SCRUM, KANBAN y todas tienen un común denominador que es el

trabajo en equipo en donde cada integrante tiene una tarea específica y se muestran las ventajas y desventajas de cada metodología, siendo un punto de partida para los interesados en el desarrollo de software que deseen entrar al mundo de los marcos ágiles. Se presenta una comparación entre las diferentes metodologías y será a criterio de cada desarrollador la elección de la más apropiada, pero en el trabajo no se presenta una ayuda para ellos determinar cuál elegir acorde a las necesidades de cada proyecto.

Sánchez [28] define una metodología para el desarrollo de software de gestión basado en componentes, integrando las prácticas ágiles, estándares internacionales de gestión de proyectos y calidad de software y el modelo CMMI, para la mejora de las evaluaciones en los indicadores que miden la ejecución del proyecto, DAC (Desarrollo Ágil con Calidad) es un compendio de prácticas de PMBOK, CMMI-DEV, ISO/IEC 12207, XP, Scrum, FDD y el Manifiesto Ágil. Se debe validar la metodología mediante el criterio de expertos y aplicándola en un entorno empresarial para probar su efectividad en este sector.

Wells et al. [29] investigan la aplicación de metodologías de gestión de proyectos ágiles (PMM), examina cómo y por qué las organizaciones eligen enfoques ágiles para gestionar proyectos de Tecnología de la Información/ Sistemas de Información (TI / SI). El desarrollo del producto planteado se adhirió a la gestión de proyectos tradicional, mientras que las líneas de negocios IT / IS que cubren el desarrollo de software y los proyectos de TI / SI para clientes internos y externos generalmente fueron más diligentes al tratar de implementar los PMM ágiles, SCRUM y XP. La principal limitación de este capítulo es que la investigación cuenta con un único caso de estudio.

Johnson [30] presenta ideas sobre los indicadores de cuándo y dónde es más apropiado usar técnicas de gestión de proyectos Lean o Agile, y cómo hacer la transición entre los dos. El caso de estudio utilizó ejemplos de éxito y fracaso del mundo real, al aplicar estas técnicas para enriquecer su teoría propuesta sobre Lean y Agile.

Chávez et al. [31] implementan las metodologías Scrum y Xtreme Programming para automatizar todos los procesos de la escuela Sangay como el ingreso de las matriculas, inscripción, generación de libretas de calificaciones, etc. Se logró mejorar la calidad del servicio que presta a los estudiantes y padres de familia; reducir el tiempo en la ejecución de los procesos académicos y eliminar errores de cálculos.

### **3.3 Gestión de proyectos del modelo SCRUM**

Godoy [32] realiza la implementación de un modelo que simula la metodología de proyectos SCRUM. El modelo les permite a los administradores de proyectos novatos en la metodología llevar el proyecto y evaluar las consecuencias de las decisiones tomadas. En la validación del modelo, se utilizaron datos reales de tres proyectos que trabajan SCRUM. Este modelo se basa en las fases y variables particulares del marco. Se propone como trabajo futuro, enfocarse en otros subsistemas como el desarrollo de tareas, de recursos humanos y presión en el plazo.

Ghosh [33] propone la mejora del PMBOK al compararlo con los estándares de gestión de proyectos de las metodologías ágiles P2M, ICB, PRINCE2, APM and SCRUM. Aunque PMBOK continúa sirviendo como el estándar más dominante en los próximos años, aparecen otros estándares basados en la práctica para gestionar proyectos en un entorno dinámico y en el que se tiene una interrelación entre los procesos, las personas y la organización que debe administrarse para aumentar la tasa de éxito de los proyectos. El modelo propuesto para mejorar el PMBOK no es aplicado a un proyecto real, por lo que no se demuestra la mejoría en la gestión de proyectos de las organizaciones al implementar el modelo.

Fitsilis [34] compara un conjunto genérico de procesos utilizados en el PMBOK con una serie de procesos que se tienen en cuenta en la gestión de proyectos ágiles. En la comparación se identifican vacíos, diferencias, discrepancias, etc. El resultado es que las metodologías ágiles de gestión de proyectos no pueden considerarse completas, desde el punto de vista de gestión de proyectos tradicional, puesto que faltan varios procesos o no se describen explícitamente.

Díaz et al. [35] realizan el estudio de las diferentes metodologías tradicionales y ágiles para determinar cuál es la más apropiada en la gestión de los proyectos desarrollados por la empresa VoiceCenter que implementa soluciones integrales de software y hardware para la gestión telefónica de contactos y transacciones telefónicas mediante la respuesta de voz interactiva, determinando finalmente que la metodología SCRUM es la que más se acopla a las necesidades y reglas de negocio de dicha empresa. La empresa a la que se aplicó la metodología SCRUM no es de desarrollo de software, por lo que no es posible mapear las diferentes etapas del ciclo de vida del software con el marco de trabajo SCRUM.

Medina [36] realiza la integración de los distintos conceptos metodológicos y buenas prácticas propuestas por el Project Management Institute (PMI) a través de su guía PMBOK 5ta Edición y el marco de trabajo SCRUM para la Gestión de Proyectos dentro de una Empresa de Base Innovadora y Tecnológica (EBIT). Concluye que estos marcos no son excluyentes, por el contrario, se complementan y que la efectividad de cada una depende de la adaptación de sus procesos a las necesidades de los diferentes tipos de empresas. Se expone la importancia de determinar el tipo de organización para la implementación del modelo propuesto, sin embargo, el modelo debe ser tan general que cualquier tipo de organización lo pueda utilizar en sus modelos de trabajo.

Villavicencio [37] propone un proceso de gestión de cambios, el cual define las actividades a seguir para una correcta administración de los requerimientos, desde la solicitud hasta la implementación del mismo tomando en

consideración las mejores prácticas en la gestión de servicios (ITIL) y la metodología de desarrollo de software ágil Scrum. No se realizó la debida capacitación al personal administrativo y técnico sobre los marcos de referencia utilizados, ITIL y SCRUM, para cumplir con los objetivos del proceso planteado.

Alfonzo et al. [38] exponen una propuesta generada como superación de una diseñada ad-hoc probada previamente, para ser tratada a través de las prácticas y actividades de una metodología ágil como SCRUM. Se describen las diferentes fases de las dos metodologías con el fin de gestionar y controlar el proceso de desarrollo de software. Se prevé su aplicación a casos de estudio o experiencias para la implementación propuesta, en el contexto de influencia de la Universidad Nacional del Nordeste, a fin de validarla y aportar información de realimentación.

En el trabajo de investigación [39] se presenta la adaptación de la metodología Scrum para el desarrollo de software para proyectos de I+D en el ámbito universitario, considerando especialmente la importancia del Desarrollo de Software Basado en Componentes, el papel de la arquitectura de software y la gestión de personas como pool de recursos. A partir de la puesta en marcha de la metodología se producen avances importantes sobre uno de los productos iniciados, se logró poner en marcha un proyecto de centralización de datos maestros, generando una primera versión de nuevos productos, iniciando un nuevo producto y trabajando integradamente con otras instituciones. Como futuras líneas de trabajo se hace necesario continuar con la aplicación metodológica en los diferentes proyectos y productos existentes y verificar el cumplimiento de las diferentes metas planteadas.

Godoy [40] presenta el subsistema de gestión de tareas como parte de un “Modelo de Simulación Dinámico de Gestión de Proyectos de Desarrollo de Software Bajo Scrum”, el cual puede ser utilizado como herramienta para evaluar el impacto de políticas alternativas de gestión y la detección de cuellos de botella. Como trabajo futuro se planea adicionar otros subsistemas para ampliar el ámbito del modelo, permitiendo que facilite aún más las tareas previas al inicio del proyecto al SCRUM Master y al Team. Dentro de estos sub-sistemas pueden nombrarse: El cálculo de costos, comunicación en el Team, intercambio de roles, adquisición de experiencia, etc.

Yazyi [41] analiza una experiencia de taller en línea, donde se simula la aplicación de SCRUM en un proyecto de alcance limitado mediado por TIC con un equipo distribuido. La práctica de un marco de trabajo ágil como SCRUM, provee un conjunto de principios de trabajo que favorecen particularmente un mayor dinamismo de la actividad, una mejor adaptación al cambio, ciclos cortos y alternados de interacción, producción y reflexión. En el contexto de los patrones pedagógicos, los aspectos tecnológicos se presentan simplemente como precondiciones a ciertos tipos de situación de contexto, pero siempre funcionales a una estrategia pedagógica y no como aspectos centrales per se. Pinzón [42] desarrolla una plataforma web que permite de forma clara crear listas de requerimientos, historias de usuario, tareas y pruebas sobre los proyectos creados, así como establecer Sprints para el seguimiento, control y entrega de reportes que son base para la toma de decisiones y así evaluar los resultados. La metodología ágil SCRUM permitió una mayor rapidez y fluidez a la hora de realizar el software, pero para utilizarla es fundamental el entender las bases de las metodologías.

Naranjo et al. [43] desarrollan un sistema web gestor de proyectos y de seguimiento de incidencias, orientado a la metodología de desarrollo ágil SCRUM para la empresa Murano IT, solucionando la carencia de un sistema unificado para el control de incidencias y gestión de tareas en el desarrollo de proyectos de software, eliminando la duplicidad de requerimientos, facilitando la generación de reportes de SCRUM, integrando el usuario final y generando la inclusión del personal *outsourcing* al proceso de desarrollo de proyectos de software. Se propone incorporar al sistema de gestión, una opción que genere reportes sobre el tiempo de vida de cada incidencia, esto con el objetivo de conocer cuánto tarda el equipo en resolver las incidencias asignadas.

Tapia [44] propone llevar a cabo actividades desde la planeación del proyecto hasta la construcción y pruebas del producto de software para garantizar el aseguramiento de la calidad en los productos y servicios de software. Seleccionaron PSP/TSP y SCRUM como herramientas de gestión y seguimiento de calidad en proyectos de software, la norma ISO 9126 para definir la calidad de los productos y la norma ISO 90003 como apoyo y/o complemento en la definición del modelo de calidad. Las metodologías ágiles utilizadas son altamente recomendables debido a la flexibilidad de ajuste a cambios constantes obteniendo beneficios en el incremento de la productividad y en la elaboración de estimaciones más precisas para elevar la competitividad de los equipos de trabajo. Como trabajo futuro se podría plantear el modelo para que aplique en empresas grandes.

Nazareno et al. [45] proponen un modelo de trazabilidad basado en las prácticas de SCRUM, que permite representar las trazas existentes entre los artefactos generados durante procesos SCRUM. Es imprescindible para proyectos ágiles de escala industrial definir la recuperación de los enlaces y la planificación de la trazabilidad para que su uso sea realmente efectivo, y no un sobre trabajo. Godoy [46] presenta un ejemplo de la utilización de un modelo dinámico de simulación como herramienta de ayuda en la gestión de proyectos de desarrollo de software llevados a cabo con la metodología SCRUM. El modelo permite a los Scrum Masters y el Team analizar el efecto del uso conjunto de la metodología SCRUM, bloques de tiempo, artefactos y reglas en la gestión de los mismos en diferentes escenarios. Como trabajo futuro se pretende avanzar con la construcción de modelos similares para otras metodologías consideradas ágiles como Cristal Clear y Crystal Orange o incluir prácticas como por ejemplo Test Driven Development.

Cortes [47] propone integrar algunas de las buenas prácticas de la metodología PMI en el desarrollo de los proyectos de la fábrica de software y recurrir a fortalecer la dinámica de trabajo con las recomendaciones de la metodología

SCRUM en el desarrollo del producto, para la Fábrica de Software de la Fundación Cardiovascular de Colombia (FCV). Como trabajo futuro, se propone la estrategia de tener un perfil o rol dentro de la Fábrica de Software, como Gestor de Proyectos de Software.

Scornaenqui et al. [48] desarrollan una herramienta que le permite al administrador del proyecto realizar planificaciones eficientes y aprovechar al máximo las habilidades de cada recurso, ya que el plan de trabajo resultante reflejará las decisiones tomadas por el administrador en proyectos anteriores. Actualmente la herramienta sólo captura conocimiento con base en las habilidades del recurso, los requerimientos de las tareas y las calificaciones obtenidas, sin tener en cuenta aspectos como el trabajo en equipo, es decir que el desempeño de un recurso para las mismas tareas puede variar dependiendo el grupo de trabajo en el que se encuentra. Por otro lado, tampoco se tienen en cuenta otros aspectos externos como por ejemplo el equipamiento con el que cuenta cada recurso para realizar su trabajo. La incorporación de un mecanismo de captura de conocimiento más complejo, que tenga en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, incrementaría aún más la potencia de la herramienta a la hora de planificar automáticamente.

Babativa et al. [49] seleccionan a la empresa Greensqa para realizar la identificación y análisis de riesgos, a través de la metodología ágil SCRUM, debido a que metodologías como la propuestas en el PMBOK implican realizar una planificación detallada, en la cual se identifican los riesgos, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo y se utilizan una serie de diferentes técnicas y herramientas, con el fin de generar un plan de respuesta a los riesgos, con el objetivo de poderlos controlar. A través del modelo se mejora la gestión de riesgos en proyectos de pruebas de Software, específicamente en los componentes de tiempo, presupuesto, comunicación y herramientas metodológicas empleadas. Para futuros trabajos de investigación se recomienda continuar con la aplicación, implementación, medición y control de cada una de las fases y actividades contenidas en el modelo ágil propuesto en esta investigación.

#### 4. MÉTODO

Este capítulo es el punto de partida para el diseño de un modelo que busca incorporar las diferentes herramientas de gestión de proyectos PMBOK con el marco de trabajo SCRUM supliendo las necesidades que tienen los patrocinadores de los proyectos de tener una retribución temprana de su inversión, con las estimaciones y planeaciones de tareas que tienen los equipos de desarrollo de software, en la Figura 1 se presentan las etapas a seguir para el diseño del modelo propuesto.

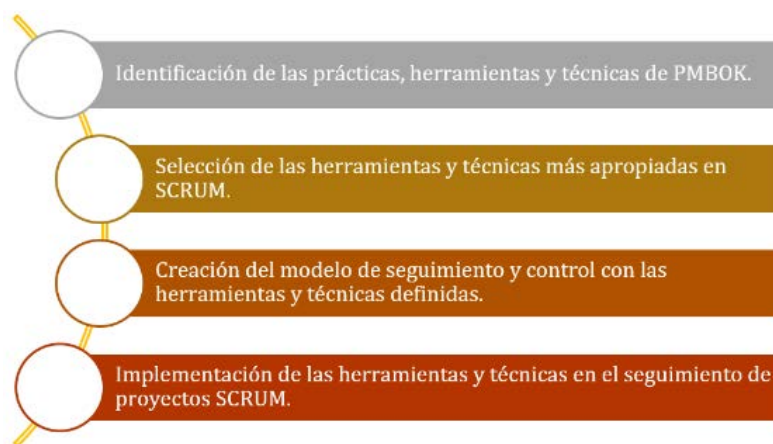


Figura 1. Etapas para la generación del modelo propuesto

Posterior al desarrollo, se plantea la validación del modelo diseñado mediante un juicio de expertos en el programa de transformación digital Bancolombia, para la verificación de los resultados obtenidos. Realizando de esta manera la corrección y ajustes de las posibles fallas que se puedan presentar.

#### 5. RESULTADOS

De acuerdo con los trabajos analizados se puede evidenciar que las metodologías o marcos de trabajo utilizados en el desarrollo de software sean tradicionales o ágiles, carecen de algunos temas presentados en la gestión de proyectos como los son: La administración de recursos humanos, de adquisiciones, contrataciones, costos, alcance y riesgos. Los cuales son claves para la consecución exitosa de un proyecto. La mayoría de los modelos propuestos para la mejora de la gestión de proyectos en cuanto a la etapa de seguimiento y control no son implementados dentro de una organización, por lo tanto, no se puede validar que dichos modelos generan valor a la gestión de proyectos. No se tienen trabajos de investigación centrados en el seguimiento y control de los proyectos SCRUM basados en PMBOK. La metodología SCRUM carece de la generación de documentación y planeación, lo que lleva a que sea difícil realizar un seguimiento y control de la misma, la eliminación de impedimentos se va dando con el día a día lo que impide visualizar los riesgos presentados a largo plazo. En la Tabla 1 se presenta la clasificación de las referencias del área de gestión de proyectos de software.

Se concluye que los artículos analizados referentes a la gestión de proyectos de software se encuentran finalizados y aplicados en una organización, pero estos son proyectos netamente de gestión de proyectos basados en PMBOK, más no integrados con metodologías ágiles como SCRUM. Por lo que se observa que existen muchas empresas que todavía basan el desarrollo de software en metodologías tradicionales. En la Tabla 2 se presenta la clasificación de las referencias encontradas con relación a la implementación de metodologías ágiles en proyectos de software. Se observa que la mayoría de los artículos analizados son de revisión de la literatura y de los que son aplicados, hay pocos que presentan resultados finales, lo que dificulta tener conclusiones que determinen el manejo de metodologías ágiles en las organizaciones que producen software. En la Tabla 3 se presentará la clasificación de las referencias analizadas sobre la gestión de proyectos del modelo SCRUM.

**Tabla 1.** Clasificación gestión de proyectos de software

Ref.	Revisión	Ejecución	Finalizado	Aplicado
[10]			✓	✓
[11]	✓			
[12]	✓			
[13]		✓		✓
[14]		✓		
[15]	✓			
[16]			✓	
[17]			✓	✓
[18]	✓			
[19]			✓	
[20]			✓	✓
[21]			✓	✓
[22]			✓	

**Tabla 2.** Clasificación implementación de metodologías ágiles para proyectos de software

Ref.	Revisión	Ejecución	Finalizado	Aplicado
[23]	✓			
[24]	✓			
[25]	✓			
[26]		✓		✓
[27]	✓			
[28]		✓		
[29]			✓	✓
[30]			✓	✓
[31]			✓	✓

**Tabla 3.** Clasificación Gestión de Proyectos del Modelo SCRUM

Ref.	Revisión	Ejecución	Finalizado	Aplicado
[32]		✓		✓
[33]	✓			
[34]	✓			
[35]			✓	✓
[36]			✓	✓
[37]		✓		✓
[38]		✓		✓
[39]		✓		✓
[40]			✓	
[41]	✓			
[42]			✓	✓
[43]		✓		✓
[44]	✓			
[45]			✓	✓
[46]		✓		✓
[47]			✓	✓
[48]		✓		✓
[49]			✓	✓

La mayoría de artículos encontrados son aplicados en una empresa, pero muchos de ellos se encuentran en proceso de ejecución, por lo que no se observan resultados finales. Además de que explican cómo han integrado a la metodología SCRUM dentro de las organizaciones, más no se propone un nuevo modelo de metodología SCRUM que tenga un mayor seguimiento y control de los proyectos. El modelo a desarrollar busca incorporar técnicas y herramientas de gestión de proyectos de PMBOK para el seguimiento y control de los proyectos de software que se gestionan con SCRUM. Al trasladar a la realidad el modelo de SCRUM se ha visualizado el problema de que el equipo de desarrollo está trabajando a su velocidad y su ritmo y, sin embargo, los patrocinadores y gerentes esperan la generación de resultados y retribución de la inversión de una manera más rápida a los proyectos que trabajan con la metodología tradicional. Las herramientas y estándares de gestión de proyectos ayudan a las empresas de tecnología a estimar y hacer un seguimiento de los proyectos que se llevan a cabo acoplándose a los objetivos organizacionales de las compañías, haciendo por medio de una buena planeación que los proyectos finalicen en el tiempo y con el costo esperado.

## **6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Los proyectos sean gestionados de la manera tradicional o con metodologías ágiles puntualmente SCRUM, siempre deberán ser controlados por los gerentes de proyectos para lograr que estos estén alineados con la estrategia organizacional de las empresas de desarrollo de software.

La mayoría de los modelos propuestos presentados en la revisión de la literatura, para la mejora de la gestión de proyectos en cuanto a la etapa de seguimiento y control no son implementados dentro de una organización, por lo tanto, no se puede validar que dichos modelos generan valor a la gestión de proyectos.

Dentro de la revisión de la literatura realizada, no se tienen trabajos de investigación centrados en el seguimiento y control de los proyectos SCRUM basados en PMBOK.

Como trabajo futuro se plantea la creación del modelo de seguimiento y control propuesto en este capítulo, para que los gerentes y patrocinadores tanto del programa de transformación digital como proyectos con características similares, puedan visualizar el progreso de los proyectos que tienen a cargo y de esta manera puedan tomar decisiones oportunas en cuanto a los ítems principales de la gerencia de proyectos, costos, tiempo y recursos.

De igual manera se propone la implantación del modelo dentro de una organización que tenga como metodología principal SCRUM y que sea validado por personas expertas tanto en la metodología SCRUM como en PMBOK para definir con el criterio adecuado si el modelo aplica y podría mejorar la gestión de proyectos de software con la metodología SCRUM.

Incorporar técnicas y herramientas de seguimiento y control de PMBOK en el marco de trabajo SCRUM hará que se pueda mejorar el cumplimiento de las necesidades de tiempo y costo que tienen los gerentes y patrocinadores de los proyectos que se gestionan con SCRUM.

## REFERENCIAS

- [1] Beck, K. et al. (2001). Manifiesto for agile software development. <http://www.agilemanifesto.org>.
- [2] Cadavid, A., Martínez, J. & Vélez, J. (2013). Revisión de metodo. ágiles para el desarrollo de soft. *Prospectiva* 11(2), 30-39.
- [3] Canós, J. & Letelier, M. (2012). Metodologías ágiles en el desarrollo de software. DSIC -Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Lledó, P. & Rivarola, G. (2007). *Gestión de proyectos*. Pearson Educación.
- [5] Project Management Institute (1987). *Project Management Body of Knowledge (PMBOK)*. Project Management Institute.
- [6] Guerrero, L. (2016). *Gestión en Proyectos de Software*. *Tecnología Investigación y Academia* 4(2), 12-19.
- [7] Figueroa, R., Solís, C. & Cabrera, A. (2008). Metodologías tradicionales vs. metodologías ágiles. *Universidad Técnica Particular de Loja. Escuela de Ciencias de la Computación*.
- [8] Villanueva, J. & Siachoque, M. (2014). Scrum y RUP: comparativa y propuesta metodológica. *Tecnología, Investigación y Academia* 1(1), 39-49.
- [9] Kniberg, H. et al. (2010). *Kanban y Scrum—obteniendo lo mejor de ambos*. USA: C4Media Inc.
- [10] Torres, F. (2009). Integración del PMBOK al RUP para proyectos de Desarrollo de Software. In *Octava Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática*.
- [11] Díaz, C., Marrugo, A. & Mora, E. (2015). *Herramientas de gestión en la integración en las etapas de planeación y seguimiento de proyectos. Tesis especialización en gestión integral de proyectos*. Universidad de San Buenaventura Cali.
- [12] Salazar, J. & Delgado, M. (2017). Costos como factor clave en la gestión de proyectos de software. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada* 1(29), 99-104.
- [13] Ramírez, C. et al. (2013). Integración entre PSP y PMBOK aplicada al desarrollo de un sistema experto para el diagnóstico de identificación automática de enfermedades profesionales. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Manizales.
- [14] Muñoz, S. (2014). Definición de un modelo de gestión de proyectos basado en PMBOK y OPENUP para desarrollo de software Tesis de Maestría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- [15] Parra, C., Lancheros, D. & León, M. (2016). Técnicas utilizadas en la gestión de integración en la planeación y seguimiento de proyectos en las organizaciones de Cali-Colombia. Trabajo de grado especialización gestión integral de proyectos. Universidad San Buenaventura.
- [16] Nájera, Á. (2016). Desarrollo de un modelo integrado de procesos para la gestión de proyectos diseñados según PMBOK®, homologable con ISO 21.500: 2.012 y compatible con PRINCE2®. MIGP: Modelo de Gestión Integrada de Proyectos. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- [17] Gutiérrez, C. et al. (2015). Modelado de los Procesos para el Seguimiento y Control de Proyectos de Investigación, en el Sector Educativo, utilizando redes de Petri. *Gestión Educativa* 2(5), 984-992.
- [18] Ter, Y. et al. (2015). Project Evaluation: A Mixed-Method Study into Dilemmas in Continuation Decisions. In *48th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [19] Olivero, M. & Rincón, H. (2012). Lineamientos generales control de los costos en los proyectos: Un caso de análisis. *Revista Universo Contábil*, 8(3), 135-148.
- [20] Macavilca, C. & Jesús, D. (2017). Implantación de la Oficina de Gestión de Proyectos PMO de TI en una empresa de Telecomunicaciones bajo el enfoque metodológico PMI–PMBOK. Tesis de Maestría. Univ. Nacional Mayor de San Marcos.
- [21] Presedo, C., Dolado, J. & Aguirregoitia, A. (2010). Estudio de métricas para el control de proyectos software. *Actas de los Talleres de las Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos* 4(1), 65-72.
- [22] Carreño, É., Velásquez, J. & Andrea, L. (2016). Elaboración de una Guía para Auditoría a la Gerencia de Proyectos de Desarrollo de Software con enfoque PMI®, Aplicable a las Áreas de Alcance, Tiempo y Costo. Trabajo de grado maestría en desarrollo y gerencia integral de proyectos. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.
- [23] Balaguera, Y. (2013). Metodologías ágiles en el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles. Estado actual. *Revista de Tecnología* 12(2), 111-123.
- [24] Navarro, M. et al. (2017). Selección de metodologías ágiles e integración de arquitecturas de software en el desarrollo de sistemas de información. In *XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*. Buenos Aires, Argentina.
- [25] Hoyos, Q. & Alexander, R. (2016). Método para la especificación del problema en proyectos de desarrollo de software trabajados con metodologías ágiles. Tesis de Maestría en tecnologías de la información y la comunicación. Universidad Pontificia Bolivariana.
- [26] Montoya, J. (2016). Comparación de metodologías ágiles y procesos de desarrollo de software mediante un instrumento basado en CMMI. *Scientia et Technica* 21(2), 150-155.
- [27] Suarez, L. et al. (2016). Análisis comparativo de las metodologías ágiles en el desarrollo de software aplicadas en Colombia. *Corporación Centro Internacional de Marketing Territorial para la Educación y el Desarrollo*.
- [28] Méndez, A. (2015). Modelo y prácticas esenciales de la metodología dac integrando los métodos ágiles, pmbok y cmmi-dev. *Revista QUID* (21), 13-24
- [29] Wells, H., Dalcher, D. & Smyth, H. (2015). The adoption of agile management practices in a traditional project environment: An IT/IS Case Study. In *48th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [30] Johnson, J. (2017). Lean or Agile: Lessons Learned from a Tech Startup. *PM World Journal* 6(8), 1-20.
- [31] Chávez, A. & Tenorio, J. (2012). Desarrollo de un sistema de control escolar para la Escuela Bilingüe Sangay combinando las metodologías Scrum y Xtreme Programming. Trabajo de grado. Sangolquí.
- [32] Godoy, D. et al. (2014). Simulando proyectos de desarrollo de software administrado con Scrum. In *XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.
- [33] Ghosh, S. et al. (2012). Enhance PMBOK® by Comparing it with P2M, ICB, PRINCE2, APM and Scrum Project Management Standards. *PM World Today* 14(1), 1-77.
- [34] Fitsilis, P. (2008). Comparing PMBOK and Agile Project Management software development processes. In *Advances in Computer and Information Sciences and Engineering Conference*. Springer.
- [35] Díaz, C. & Enrique, L. (2017). Propuesta metodológica para gestión de proyectos de desarrollo de software personalizado y marco de trabajo para soporte técnico de la empresa voicecenter que presta soluciones de sistemas de call center. Tesis de Maestría. Universidad de las Américas.

- [36] Medina, R. (2017). Diseño de marco ágil para la dirección de proyectos de desarrollo de producto en una ebit integrando las mejores prácticas de Pmbok y Scrum. Trabajo de grado. Universidad Militar Nueva Granada.
- [37] Villavicencio, J. (2017). Modelo de gestión para el control de cambios y la dirección de proyectos basados en ITIL y metodologías ágiles dentro de la provisión de servicios de un departamento de desarrollo de software. Tesis de Maestría. Universidad de Cuenca.
- [38] Alfonzo, P., Mariño, S. & Godoy, M. (2012). Propuesta metodológica para la gestión de proyecto de software ágil basado en la Web. *Multiciencias* 11(4), 395-401.
- [39] Straccia, L. et al. (2016). Metodología para el desarrollo de software en proyectos de I+ D en el nivel universitario basada en Scrum. In XXII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- [40] Godoy, D. et al. (2014). Simulación Dinámica de Gestión de Tareas en Proyectos Desarrollados Con Scrum. In II Congreso Nacional de ingeniería informática/ingeniería de sistemas.
- [41] Yazzi, S. (2011). Una experiencia práctica de Scrum a través del aprendizaje basado en proyectos mediado por TIC en un equipo distribuido. Tesis de Maestría. Universidad de Salamanca.
- [42] Pinzón, J. (2016). Plataforma para el seguimiento de proyectos con metodología Scrum. Trabajo de grado. Fundación Universitaria los Libertadores.
- [43] Díaz, C., Marrugo, A. & Mora, E. (2015). Herramientas de gestión en la integración en las etapas de planeación y seguimiento de proyectos. Trabajo de grado. Universidad de Guayaquil.
- [44] Tapia, C. (2009). PSP/TSP, SCRUM e ISO 9126 y 90003 en combinación como herramienta de trabajo para la construcción en pequeños y medianos proyectos. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro.
- [45] Nazareno, R. et al. (2016). Modelo para la Automatización de Relaciones de Trazabilidad en Procesos Scrum. Universidad Tecnológica Nacional.
- [46] Godoy, D. et al. (2014). Evaluación de alternativas de gestión en proyectos de software desarrollados con scrum utilizando dinámica de sistemas. In XX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- [47] Cortes, Á. (2017). Lineamientos para la planeación y estimación de actividades en el marco de la Fábrica de Software de la Fundación Cardiovascular de Colombia (FCV) basados en metodología SCRUM y PMI. Tesis de Maestría. Universidad Santo Tomás Bucaramanga.
- [48] Scornaienqui, A. & Durand, J. (2016). Un enfoque basado en planning para la gestión de proyectos en scrum. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias exactas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- [49] Velásquez, B. et al. (2017). Identificación y análisis de riesgos con metodología ágil Scrum, en la dirección de proyectos de pruebas de software en Bogotá, aplicado a la empresa Greensqa. Tesis de especialización en gerencia de proyectos. Universidad EAN.



Las bases de datos han sido un barril donde se ha guardado información de todo tipo, típicamente se han usado con el propósito de cargar y luego recuperar información en forma transaccional, lo que ha dado inmediatez y ha permitido el avance hacia una sociedad globalizada e interconectada, ¿pero ¿cuál es el próximo paso? Internet y las tecnologías de información y las telecomunicaciones TIC, han permitido a millones de personas interactuar usando redes sociales. Twitter en especial, es uno de esos barriles llenos de información, que es camuflada como una red social que permite a los usuarios publicar gustos, preferencias e ideas con el propósito de reconocer patrones que surgen al analizar el comportamiento de millones de usuarios alrededor del mundo. Twitter, al conjugarlo con herramientas emergentes como el Big Data y la minería de datos, consiguen encontrar esos patrones de comportamiento que predicen con gran exactitud las decisiones de un público objetivo, para luego ser usadas con fines de lucro o ventaja competitiva a nivel empresarial. A nivel personal, Twitter permite promover ideas políticas, activismo en favor de todo tipo de causas, e incluso influenciar de manera efectiva decisiones políticas en un país. Twitter por su contenido plural permite hacer estudios sociales, estudios de productos, de marcas, estudios políticos y antropológicos a grupos poblaciones específicos, usando para este fin un instrumento mejor que pequeñas muestras estadística, aprovechando la información depositada por millones de usuarios; además, no se limita a la percepción, sino que se basa en una realidad que en muchos casos desconocen los propios usuarios, que puede variar segundo a segundo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es innegable que las Tecnologías de la información y las telecomunicaciones TIC han mostrado ser un ente social que modela la vida de las personas, bien sea a través de nuevos objetos electrónicos, acceso a información e incluso a nuevas formas de comunicación como es el caso de los Microblogging, los cuales son en últimas una nueva forma de comunicación en la que los usuarios pueden describir su estado actual en publicaciones cortas distribuidas en mensajes instantáneos, usando teléfonos móviles, correo electrónico o Web. Los usos que dan las personas a este fenómeno social de los microblogging son variados, como por ejemplo hablar sobre sus actividades diarias y para buscar o compartir información entre otros [1].

Twitter, es una herramienta muy popular de microblogging, nacida en el 2006 y desde ese momento su crecimiento ha sido exponencial, pese al estancamiento que ha tenido en los últimos años, se puede considerar un fenómeno social usado por más cuatro millones de nuevos usuarios mensuales durante el tercer trimestre de 2017, y en conjunto, la compañía reúne 330 millones de usuarios según la revista especializada genbeta.com [2]. Indiscutiblemente Twitter como fenómeno ha influenciado aspectos sociales en forma profunda, por lo que pueden surgir preguntas que intenten explicar ¿cómo ha influido twitter en nuestra identidad virtual, en las noticias y medios sociales en el activismo personal?

Para responder estas preguntas será necesario entender a las redes sociales como un fenómeno contemporáneo mediado por las TIC, y tener entendido que redes sociales como Twitter replantean la vida diaria en sus formas básicas de comunicación, interacción y producción a muchos niveles, desde las interacciones entre estudiantes, el reencuentro de viejos amigos, hasta el teletrabajo y las comunicaciones empresariales, aportando en muchos casos la inmediatez y la cobertura que otros medios más formales no tienen.

## 2. COMPRENDIENDO A TWITTER

“Comenzamos con una idea sencilla, pero potente: Deja que las personas cuenten lo que está pasando en el mundo en este momento” [3], esta es una frase con la que Twitter quiere hacer entender qué es lo que ellos hacen. Según Gabriel Arrabal, profesor de Comunicación y Diseño y Secretario General de EADE, Su particular forma de interactuar ha sido muy bien acogida por los comunicadores, quienes se sienten especialmente cómodos en Twitter: por su formato próximo a los titulares breves [4], y esto parece ser cierto, puesto que en un espacio de 140 caracteres como los que Twitter permite escribir a sus usuarios, se puede escribir información de gran trascendencia, incluso a nivel presidencial, de hecho, se observa como es usado por periodistas, políticos y empresas para sentar posición respecto a temas delicados, hacer acusaciones e incluso publicitar productos.

Como en todos los aspectos de la vida Twitter también presenta fortalezas y debilidades, según Beatriz Fainholc de la Universidad Nacional de La Plata es interesantes reconocerlas por sus posibles impactos en la socialización y

---

<sup>1</sup> roberto.guevara@uniremington.edu.co

<sup>2</sup> yolfaris.fuertes@uniremington.edu.co

formación contemporáneas, en la Tabla 1 se muestran algunas fortalezas y debilidades de Twitter. No obstante, la forma en que se gestiona el conocimiento deberá estar alineada con la estrategia y las actividades organizacionales, donde se tome en cuenta el *stock* estático de conocimientos y sus flujos [3]. Además, se ha encontrado en la literatura algunos conceptos sobre gestión de conocimiento asociado a competencias, habilidades y experiencias, que una persona posee y utiliza en la búsqueda de soluciones para determinadas situaciones o problemas en su entorno laboral.

**Tabla 1.** Fortalezas y debilidades de Twitter (Adaptada de [5])

Fortalezas	Debilidades
Es una herramienta democrática, – si la persona posee conectividad-, porque se halla al alcance prácticamente de todos los que deseen pasarse datos e información.	Practica un impacto disruptivo con una escritura en su modo de solo 140 caracteres.
Posee rasgos de portabilidad, rapidez, gratuidad, flexibilidad, amistad y facilidad de aprendizaje y manejo.	Entre sus riesgos se hallan aquellas acciones de quienes deben recortar lo que creen “es interesante y/o relevante” para <b>transmitir/publicarlo en la red Twitter.</b>
Facilita la posibilidad de generación de síntesis, por una escritura de tipo telegrama.	Se manifiesta en una circulación la mayor parte de las veces, a modo de noticias vacías de contenido.

## 2.1 La identidad Virtual

En un estudio realizado sobre la identidad se afirma que : “es ahora más que nunca , es una suma de identificaciones inestables y móviles, características que parecen visibilizarse aún más en los mundos virtuales”, esto se complementa con lo expresado [6] y otros que asumen que lo que allí se presenta es una identidad idealizada, en la que las personas construyen, ensayan y editan sus identidades virtuales mostrando lo que les gustarían o creen que deberían tener, es por ello que las redes sociales como Twitter ocultan la real identidad de la persona, y más bien esta se auto-reconfigura para mostrar una falsa identidad , o en el mejor de los casos un idealizado yo, mucho más acorde a las cualidades de un ser utópico.

Por otro lado, estas identidades son sistemáticamente renovadas debido precisamente a su origen motivacional, es decir “una imagen idealizada de sí mismo” por este motivo es de esperar que esta sea dinámica, por los mismos estados de ánimo del ser humano, lo que los autores consideran inestable, así se observa que el 44 % de los usuarios de la muestra realizaron cambios en su biografía. El componente que sufrió más cambios fue el avatar, lo que podría indicar que la imagen del cuerpo virtual es la más inestable. [7], lo que también se observa en la vida real en relación al cuerpo físico, con la diferencia que es más fácil cambiar lo que se denomina el cuerpo virtual o avatar.

Existe una clara correspondencia con el mundo real en la forma de nombrarse, puesto que 65,4% de los usuarios eligió utilizar el nombre y el apellido al momento de nombrar su cuenta y solo un 0,4% usó un personaje ficticio o seudónimo-anónimo; se observa que en total el 90,6% utilizó referentes de la realidad para nombrarse, esto da cuenta de forma consecuente que se busca transferir la identidad real al mundo virtual , solo que con algún grado de idealización o retoque que les permita “verse mejor”.

## 2.2 Noticias en Twitter y medios sociales

Las redes sociales por su inmediatez y el grado de interactividad que ostentan han permeado el campo de la difusión de noticias y en general el periodismo [8], hoy es incuestionable que los medios sociales han transformado la manera de hacer y consumir los productos periodísticos. Algunos afirman que esta actividad particular “se limitaba a leer el periódico, escuchar un boletín en radio o verlo por televisión” [9], hoy existen una gran cantidad de medios que permiten enterarse de las noticias casi en forma inmediata, entre ellos el Twitter, relegando a medios tan posicionados como el periódico, la radio o la televisión; en este aspecto el Twitter les aventaja por una razón, todos tenemos un celular a mano, además muchos periodistas escriben en segundos un primer avance en solo 140 caracteres, otros medios como radio, televisión y periódico requieren de una formalización y proceso audiovisual que no puede competir con Twitter, al menos en aspectos como inmediatez e interactividad.

En el mundo globalizado de hoy y altamente interconectado, es poco probable que una noticia a nivel mundial y de interés público tarde días en llegar a países distantes , sin embargo Deutschmann y Daniel son encontraron, que en la década de los sesenta, una noticia podía tardar hasta un par de días en cumplir su ciclo de difusión aun cuando tuviese amplia cobertura mediática [10], las redes sociales y en especial Twitter serian factores clave para que la misma noticia se difundiera en pocas horas a nivel global, al no ser twitter un ente noticioso como tal, requiere del contenido que los usuarios estén dispuestos a escribir, en este punto juegan un papel preponderante los periodistas que usan internet como medio de difusión, el mismo artículo revela que se encontró:

“El comportamiento de 22 perfiles en medios sociales entre los que se encontraban, precisamente, medios de comunicación (corporativos) y periodistas (personales). En dicho análisis se encontró que, para el caso de Argentina, en un periodo de 12 semanas (con una recolección de data por semana), los medios corporativos recibieron de promedio una respuesta por cada 322 tuits (0,31 %), contrario a lo que sucedía con los perfiles personales (una por cada tres tuits, es decir, 31,76 %).” Esto indica que los periodistas a modo personal pueden estar recibiendo mayor atención que los medios de comunicación corporativos. No obstante, las cifras mostradas por [10] advierten que en Latinoamérica existen estudios insipientes.

### 3. ACTIVISMO EN TWITTER

Uno de los elementos más importantes para cualquier movimiento social, es su poder de difusión, en dicho contexto, la idea de aprovechar las redes sociales para la difusión de los propósitos de los activistas asociada a la web 2.0 o web social, merece atención, y podría representar una forma alternativa de promover asuntos políticos, económicos e ideológicos de diferente a los medios tradicionales, que se encuentran acorralados por sus principios editoriales o su financiamiento económico o estructurales, [11]

Una tendencia cada vez más usada para promover al activismo por twitter son las llamadas “TweetStorm”, esta es una acción coordinada por muchos usuarios para enviar el mismo tweet al mismo tiempo, generando una “tormenta” de tweets. Este actuar se ha comprobado que es altamente efectivo al momento de promover ideas y partidos políticos, es así, como la tecnología modifica la comunicación política sin oponerse a las estrategias tradicionales de los partidos políticos. Un ejemplo reciente es la campaña electoral de Trump en Estados Unidos con la inclusión de mensajes en medios tradicionales y tweetstorms que animaban a los partidarios a ampliar sus narraciones y crear nuevas historias sobre lo que estaba sucediendo en las redes sociales, o también la realizada por el partido Podemos en las elecciones generales de España de 2015 [12]

Algunas organizaciones como Amigos Pro Animal no aprueban la protesta en las calles, mediante marchas y otras manifestaciones, pero sí aprueba y recurre con cierta frecuencia a la protesta en la red. Con frecuencia se suma a tweetstorms para presionar a los legisladores y autoridades locales y nacionales, a poner atención sobre asuntos concretos en materia de protección animal, también algunas organizaciones suelen unirse a tweetstorms en momentos específicos. En varios de éstos se aprecia un sentido de solidaridad con las acciones de otros grupos activistas [13]

### 4. BIG DATA EN TWITTER

Cada vez son más los usuarios que entran a formar parte del gran mundo de las redes sociales como el Instagram, Facebook y Twitter; estas han venido a revolucionar el mundo digital del siglo XXI, no solo por la utilidad que ofrece al usuario activo los recursos disponibles en estas plataformas tecnológicas, sino porque también se han convertido en herramientas recolectoras de datos o de grandes volúmenes de información muy útiles en la época del Big Data; Twitter al igual que otras redes sociales, es una aplicación a través de la cual los usuarios pueden compartir diversos tipos de información que ofrece la posibilidad a otros usuarios, empresas y organizaciones de mantenerse informado o de aprovechar las publicaciones para mantenerse en contacto con los acontecimientos actuales. En el documento titulado extraer y trabajar con datos de Twitter, [14] se afirma que: Big data se ha convertido en uno de los principales focos de análisis en el entorno académico e investigador, y en uno de los principales sectores de inversión de muchas compañías y administraciones que ven en el tratamiento de grandes cantidades de datos (conjuntos de más de 1 terabyte) una forma de mejorar rendimientos y tomas de decisión o de realizar predicciones de futuro.

El impacto del Big Data en algunas redes sociales como Twitter ha venido a revolucionar el mundo de los negocios, sobre todo porque estos sitios populares se han convertido en una gran masa de extracción y observación de información que facilita la toma de decisiones de los actuales devoradores del mercado global, quienes se apoyan en las inmensas cantidades de datos almacenados en estas redes para analizar los diversos comportamiento de los consumidores, lo que les permite idear estrategias de marketing que sean competitivas frente a otras organizaciones que ofrezcan los mismos productos. Por consiguiente, en la era actual, es un cambio cultural muy prometedor que enfrentan las organizaciones, ya que la inmersión del Big Data en las redes sociales trae consigo como requisito que las organizaciones capaciten a su personal para enfrentar adecuadamente esta nueva forma de mercadeo global.

Uno de los mayores escenarios en donde se puede evidenciar los enormes efectos del Big Data en las redes sociales es el tema de la política, en donde a través de tuits puntuales los colombianos, el mismo gobierno y los candidatos a un proceso electoral pueden hacer seguimiento al comportamiento de los usuarios respecto a sus puntos de interés, así mismo los usuarios pueden identificar las propuestas que más se acerquen a sus intereses como ciudadano perteneciente a un país determinado.

Es así como la tecnología Big Data como plataforma analítica, equipada con un sistema de inteligencia artificial, tiene la capacidad de realizar interpretaciones de los diversos anuncios de los usuarios publicados a través de las redes sociales como Twitter, favoreciendo a las empresas y organizaciones en la toma de decisiones y mejoramiento continuo de los productos que comercializan en el mercado global. Es así como esta plataforma se ha convertido en la actualidad en una herramienta digital muy apetecida en el mundo de los negocios para diversas compañías que ven en ella la posibilidad de crecer competitivamente obteniendo respuestas de cómo realizar cuantiosas tareas relacionadas que se analizan a través de patrones y predicciones acertadas; por lo cual, es claro que la tecnología Big Data es una gran mina de oro para las organizaciones. Sin embargo, es necesario tener presente algunas recomendaciones al hacer uso de esta tecnología:

1. Cuando obtenga resultados del análisis de un gran volumen de datos, no deje que la máquina decida, sea precavido, observe lo que los datos le muestran, pero tome las decisiones de una forma inteligente, por supuesto, teniendo presente los beneficios para su organización.

2. Realice una excelente exploración del mercado, esto le facilitará la toma de decisiones a la hora de realizar el análisis de datos.
3. Mejorar la seguridad tanto en infraestructura como en capacitación del personal en la era del Big Data. La Tabla 2 muestra las ventajas y desventajas del Big Data.

**Tabla 2.** Ventajas y Desventajas del Big Data (Adaptada de [18])

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Análisis y recopilación de grandes volúmenes de datos continuamente.	Brecha masiva de seguridad en la era del Big Data.
Mejoramiento de la fluidez interna de la organización.	Pérdida de tiempo, energía y recursos.
Segmentación.	La no adecuada gestión de los datos.
Integración de datos.	Error en la toma de decisiones.

Es considerable resaltar, que, así como muchas compañías u organizaciones se unen a la era del Big Data, otras se quedan renuentes al cambio, debido al temor de enfrentarse a nuevas experiencias de competir en búsqueda de la mejora de sus servicios. Definitivamente las redes sociales como Twitter son la mayor fuente primaria para la recolección de datos, debido a su status cultural, lo que facilita el proceso de investigación social, y por supuesto, la recolección de muestras de las opiniones de los usuarios, lo que lleva a la mejora continua de los servicios o productos empresariales; motivo que lleva a cuestionar el por qué muchas organizaciones en pleno siglo XXI, donde manda la era digital, todavía siguen renuentes a caminar a la par con el avance tan provechoso que ofrece esta nueva tecnología de análisis con equipamiento de inteligencia artificial.

La empresa del presente se ampara en diversas herramientas de análisis de datos para Big Data que favorece a las organizaciones modernas, permitiéndoles ahorrar tiempo y por supuesto dinero, además de facilitar la toma de decisiones a través del estudio o análisis de datos. La empresa PowerData, especialista en gestión de datos, enumera la siguiente lista de estas herramientas:

- Almacenamiento y gestión de datos
- Data cleaning
- Data mining
- Análisis de datos
- Visualización de datos
- Integración de datos
- Data Collection

## **5. NETFLIX DATA MINING, TWITTER Y PYTHON**

### **5.1 Netflix y el Big Data**

Es muy evidente el éxito acogido de Netflix en el mercado competitivo de las películas por internet; acerca de lo cual [15] afirma que “gran parte de su éxito se debe a que, según los patrones de consumo de contenido de sus usuarios, ofrece y recomienda sobre contenido que según los datos analizados vía el Big Data Marketing, pueden ser de su interés”. El éxito de esta competitiva empresa estadounidense, Netflix, consiste en la identificación que hizo de las predilecciones de los usuarios en cuanto a sus gustos o preferencias comunes, en las cuales se fortaleció para llevar a la audiencia sus diversas series.

### **5.2 Data Mining con Twitter y Python**

Twitter es considerada una de las mayores fuentes de extracción de datos en la actualidad, lo cual lleva a la reorientación y potenciación de los recursos informativos que proveen los usuarios, por supuesto, lo que depende de los intereses de las organizaciones que hagan partícipe de esta minuciosa exploración a través del acceso a las estadísticas de este enorme servicio de microblogging, el cual a su vez, es considerado como una de las redes sociales más frecuentadas por las personas en el presente.

De acuerdo a [16] “con la exportación de datos de Twitter, se puede obtener la materia prima para acceder a diferentes informaciones” lo que despierta el interés de la comunidad y las organizaciones empresariales que comercializan sus servicios o productos teniendo presente los resultados de diversas estadísticas que provee algunas plataformas de las redes sociales, entre las cuales se puede relacionar a Facebook, Instagram y el mismo Twitter. Es claro que cada red social es una potenciadora herramienta de venta. El Data Mining de Twitter permite a las personas y organizaciones empresariales apoyarse en características que tienen algo en común de acuerdo al objeto estudiado, lo que lleva a facilitar la toma de decisiones a través de la predicción clasificada de las publicaciones de los usuarios con manejo de probabilidades acertadas. Es increíble analizar como los usuarios de Twitter generan millones de Tweets diariamente de acuerdo a la diversificación de los temas, los cuales son aprovechados por los expertos analíticos que hacen uso del Data Mining para su extracción a través de un lector XML o vía Xpath.

La enorme cantidad de información que se recolecta diariamente en Twitter abre una excelente oportunidad para aquellos analistas de datos que hacen uso de diversos tipos de herramientas tecnológicas como Python para realizar análisis del comportamiento, funcionalidad o viabilidad de sus servicios, productos o marcas; claro, esta recolección

de información se puede realizar a través del registro de aplicaciones facilitado por Twitter. “Para tener acceso a los datos de Twitter mediante programación, necesitamos crear una aplicación que interactúe con la API de Twitter” [17]. De acuerdo a lo anterior, es prioridad el registro de la aplicación, para lo cual, el usuario debe hacer uso de un navegador a <http://apps.twitter.com>, hacer el ingreso en su cuenta de Twitter y por supuesto, el registro de la nueva solicitud. Cabe recomendar que las configuraciones que facilita la aplicación debe tener un manejo privado por parte del usuario, sobre todo, lo que tiene que ver con las claves o token de acceso.

Para poder realizar la recolección o exploración de los datos en Twitter haciendo uso de la aplicación Python, es necesario apoyarse en la herramienta tweepy, la cual permite la administración de la cuenta de Twitter. Tweepy permite hacer un análisis muy puntual de los seguidores, lo que definitivamente facilita la recolección de muestras acerca de variados temas de interés para el analista explorador que se apoya en estas publicaciones en pro a facilitar la toma de sus decisiones frente al comportamiento del mercado, llevando esto a la creación de estrategias proactivas para conseguir nuevos clientes o retener a los ya existentes. El Data Mining es una nueva forma de lograr comprender el comportamiento de los datos, con los resultados obtenidos se puede realizar una acertada toma de decisiones que lleve al mejoramiento continuo y creciente de la organización. La tabla 3 muestra un comparativo entre Data Mining y Big Data.

**Tabla 3.** Comparativo Minería de Datos o Data Mining y Big Data (Adaptada de [19])

<b>Data Mining</b>	<b>Big Data</b>
Técnica que permite explorar enormes bases de datos.	Tecnología que captura, gestiona y procesa grandes volúmenes de datos sin exclusión.
Innovación tecnológica	Se apoya en el uso de software o herramientas tecnológicas para la identificación de los patrones comunes.
Permite extraer conclusiones de las bases de datos a través del análisis detallado de la información observada, contribuyendo en la mejora y crecimiento de las organizaciones.	Nueva tecnología que vino a revolucionar la manera en que las organizaciones o personas hacen negocios.
Su finalidad es apoyarse en diversas técnicas y tecnologías con el fin de realizar la exploración de información en búsqueda de patrones repetitivos, los cuales se diagnostican para direccionar la toma de decisiones.	Si es usado productivamente, incrementa la rentabilidad de las organizaciones o negocios que ven en ella la posibilidad de nuevas formas de hacer sus operaciones y tomar sus decisiones.
A través de la aplicación de esta herramienta tecnológica se logra obtener nuevos clientes o retener a los ya existentes.	Es de gran utilidad para el comercio y para crear enormes campañas de marketing.
Abre nuevas oportunidades de crecimiento organizacional.	Gestión de datos con resultados exitosos y rápidos, provechosos para la empresa.
Flexibilidad en la interpretación de los resultados obtenidos a través del proceso de exploración,	Se puede aplicar en diferentes sectores y entornos.
Funciona haciendo uso de algoritmos que permiten múltiples combinaciones en la búsqueda de resultados.	Herramienta de negocio que revoluciona el mercado laboral y abre las puertas a una forma de competir global y dinámicamente.

### 5.3 Pasos o procesos del Data Mining

La principal estrategia de la secuencia de estos pasos consiste en el análisis exhaustivo de los datos, determinando patrones comunes a partir de ellos. De acuerdo [17] son cinco los pasos que debe seguir la organización o persona que haga uso del Data Mining para el análisis estadístico de estos:

- Selección de datos
- Transformación de datos
- Data Mining
- Interpretación de resultados y validación
- Incorporación del conocimiento descubierto.

Los cuales, llevan a la identificación, organización, extracción, comprensión y comprobación o resolución de los datos encontrados.

## 6. CONCLUSIONES

Twitter no puede considerarse únicamente una red social con la finalidad de conectar y comunicar a las personas. Twitter, gracias a la gran cantidad de datos y flujo de información puede ser usado para múltiples fines, entre ellos la identidad virtual, identidad que cada vez se convierte en una propiedad tan valiosa como el habeas data. Twitter, como medio de divulgación tiene la inmediatez y sencillez que muchos usuarios prefieren, con lo que ha contribuido a la globalización.

Twitter ha servido a muchos intereses de forma efectiva, es así como se ha usado para hacer activismo en una forma económica y efectiva, esto abre nuevas posibilidades a grupos y minorías para exponer sus ideas; además, puede influenciar grandes decisiones políticas y protestas ya como se ha ilustrado.

La información recolectada por Twitter en asociación con el Big Data, permite a las organizaciones tener ventajas competitivas en un mercado cada vez más exigente, permite adelantarse a cambios minúsculos que de otra forma serían imperceptibles, además de hacer predicciones acertadas basadas en datos reales.

Aunque existen muchas herramientas para obtener datos de Twitter, se ha encontrado que una forma habitual, es usar el lenguaje de programación Python a través de una interfaz de programación de aplicaciones "API" que facilita el proceso de programación. A criterio de los autores, los programadores en Python encontrarán un entorno amigable para obtener la información requerida.

Si bien en el pasado el gran problema para hacer estudios a gran escala fue recopilar la información, hoy Twitter cuenta con millones de usuarios de todo el mundo que permanentemente están dando a conocer su opiniones y comportamientos, lo que es de gran interés para muchas organizaciones que ven una oportunidad de llegar al cliente de formas cada vez más efectivas, que sería muy difícil obtener por otros medios.

Usando Twitter como fuente de información y aplicando técnicas del Big data y Data Mining, se convierte en una herramienta formidable para describir los gustos y preferencias de una población de millones de usuario que cada día crece más, Twitter tiene un gran potencial que aún falta por descubrir.

Al hablar del Big Data se hace necesario relacionar algunas redes sociales como Twitter y algunos lenguajes de programación como Python que sirven de puente enlazador para la extracción de la información y análisis estadístico de datos que llevan a la selección, transformación, interpretación e incorporación de estrategias que garantizarían el éxito de los procesos de mercado, lo cual operaría para cualquier sector empresarial que esté interesado en apostarle sus estrategias inmerso en el avance del mundo digital.

## REFERENCIAS

- [1] Java, A. et al. (2007). Why We Twitter: Understanding Microblogging, Usage and Communities. In 9th WEBKDD and 1st SNA-KDD Workshop.
- [2] [Genbeta](#). Online [Apr 2018].
- [3] [Twitter.com](#). Online [Apr 2018].
- [4] Arrabal, G. & De Aguilera, M. (2016). Communicating in 140 Characters. How Journalists in Spain use Twitter. *Comunicar* 46, 10-17.
- [5] Fainholc, B. (2011). Un análisis contemporáneo del Twitter. *Revista de Educación a Distancia* 26, 1-12.
- [6] Chen, B. & Marcus, J. (2012). Students' self-presentation on Facebook: An examination of personality and self-construal factors. *Computers in Human Behavior* 28(6), 2091-2099.
- [7] Portillo, J. (2016). Planos de realidad, identidad virtual y discurso en las redes sociales. *Logos: Revista de Lingüística, Filosofía y Literatura* 26(1), 51-63.
- [8] Guevara, R., Botero, R. & Castro, C. (2015). Una revisión a los niveles de interactividad de los contenidos digitales. In *Nuevas Ideas en Informática Educativa TISE*.
- [9] Stassen, W. (2010). Your News in 140 Characters: Exploring the Role of Social Media in Journalism. *Global Media Journal: African* 4(1), 1-16.
- [10] Barbosa, E. et al. (2017). Difusión de noticias en Twitter y medios sociales, de Analítica y visualización de datos en twitter. Editorial UOC.
- [11] Santos, M. & Condeza, A. (2017). Redes horizontales de movilización: Valorando la eficiencia del activismo personal en Twitters. Editorial UOC.
- [12] García, B., Vázquez, P. & López, X. (2017). Narrativas digitales de los principales partidos políticos en España, Francia, Portugal y Estados Unidos. *El profesional de la información* 26(4), 589-600.
- [13] Flores, D. (2015). Imaginar un mundo mejor: La expresión pública de los activistas en internet. Tesis de doctorado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, México.
- [14] Suárez, S. & Guerrero, F. (2016). La conversación Sobre Big Data en Twitter. Una primera aproximación al análisis del discurso dominante. *Comunicació: Revista de Recerca i d'Anàlisi* 33(2), 3-19.
- [15] Pérez, M. (2016). [iebschool](#). Online [Jun 2017].
- [16] Marín, C. (2017). [Metriplika](#). Online [Apr 2017].
- [17] Echeverry, G. (2016). Minería de Datos con Twitter y Python. Documento de trabajo. Universidad Autónoma de Occidente.
- [18] Escalante, Y. (2016). [Big Data: Ventajas para tu empresa](#). Online [Jun 2017].
- [19] Ribas, E. (2018). [¿Qué es el Data Mining o Minería de Datos? Big Data](#). Online [Feb 2018].

# Una aproximación a un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software

Adriana Maulini<sup>1</sup>

Luciano Straccia<sup>2</sup>

María F. Pollo C.<sup>3</sup>

Universidad Tecnológica Nacional  
Buenos Aires – Argentina

El conocimiento se ha constituido en las organizaciones modernas en el recurso estratégico más importante. Debido a la importancia del conocimiento, surge la necesidad de administrarlo dentro de las organizaciones para obtener los beneficios y ventajas competitivas derivadas de éste. Por ello surge el término Gestión del Conocimiento. Un área que necesita ciertamente de la gestión del conocimiento, sobre todo en la era tecnológica, son las entidades dedicadas al desarrollo de software, incluyendo a las fábricas de software. La gestión del conocimiento en la industria del software presenta diversas dificultades y las fábricas de software que pertenecen a la categoría de pequeñas y medianas empresas además incorporan las problemáticas asociadas a este tipo de organizaciones. Este trabajo presenta conceptos vinculados a la gestión del conocimiento y las pequeñas y medianas fábricas de software, algunos modelos de gestión del conocimiento existentes y propone una aproximación a un modelo de gestión del conocimiento aplicable al tipo de organizaciones destinatarias del proyecto.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento se ha constituido en las organizaciones modernas en el recurso estratégico más importante. Un área que necesita ciertamente de la gestión del conocimiento, sobre todo en la era tecnológica, son las entidades dedicadas al desarrollo de software, incluyendo a las fábricas de software. Según Aurum et al. [1], los desarrolladores de software procesan conocimiento dinámico y de alto valor que, en muchos casos, se trata de conocimiento implícito y debido a su complejidad es difícil convertirlo en explícito. Las fábricas de software que pertenecen a la categoría de pequeñas y medianas empresas además incorporan las problemáticas asociadas a este tipo de organizaciones. En lo que respecta a la localización geográfica de la producción de software en la República Argentina, alrededor del 80% se localiza en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) y el 20% en el resto del país [2].

A partir de las dificultades para implementar modelos de gestión del conocimiento, con sus propias características diferenciales respecto a las problemáticas que presentan otro tipo de organizaciones, GEMIS (Grupo de Investigación en Metodologías de Ingeniería de Software), dependiente del Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información (DISI) de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRBA) lleva adelante un proyecto denominado “La gestión del conocimiento en pequeñas y medianas fábricas de software en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA)” [3] que busca indagar cuál es el grado de implementación de gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA, cuales son los problemas presentes en este tipo de implementaciones y qué modelos de gestión del conocimiento se podrían proponer para que las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA pudieran implementarlos.

Este trabajo presenta conceptos vinculados a la gestión del conocimiento y las pequeñas y medianas fábricas de software, algunos modelos de gestión del conocimiento existentes y propone una aproximación a un modelo de gestión del conocimiento aplicable al tipo de organizaciones destinatarias del proyecto.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Hipótesis de investigación

En el proyecto de investigación cuyos resultados parciales son presentados en este trabajo y a partir de la información inicial levantada se define la hipótesis de que las pequeñas y medianas fábricas de software tienen dificultades para implementar modelos de gestión del conocimiento, con sus propias características diferenciales respecto a las problemáticas que presentan otro tipo de organizaciones.

Tal como afirma Hernández [4] “las hipótesis de trabajo cualitativas son pues, emergentes, flexibles y contextuales, se adaptan a los datos y avatares del curso de la investigación”, por lo cual la hipótesis resulta relevante para el inicio de la investigación, aunque podría irse adaptando según los resultados que se fueran obteniendo. Las preguntas que guían el proyecto de investigación son ¿cuál es el grado de implementación de gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA? ¿cuáles son los problemas presentes en esta implementación? y ¿qué modelos de gestión del conocimiento se podrían proponer para que las pequeñas y medianas fábricas de software del AMBA pudieran implementarlos?

---

<sup>1</sup> [adri.maulini@gmail.com](mailto:adri.maulini@gmail.com)

<sup>2</sup> [lstraccia@frba.utn.edu.ar](mailto:lstraccia@frba.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> [flopollo@gmail.com](mailto:flopollo@gmail.com)



## 2.2 Objetivos de investigación

A partir de la hipótesis, se busca como objetivo general “definir e implementar un modelo de gestión del conocimiento para las pequeñas y medianas fábricas de software en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA)”. Los objetivos específicos definidos para el proyecto son:

1. Identificar y comparar modelos de gestión del conocimiento vigentes en el mundo,
2. Identificar los requisitos necesarios, propios de las organizaciones, para la implementación de dichos modelos,
3. Analizar las características de las pequeñas y medianas fábricas de software en el AMBA,
4. Determinar las necesidades asociadas a la gestión de conocimientos que poseen las fábricas de software,
5. Proponer un modelo de gestión del conocimiento adaptado a las fábricas de software en el AMBA,
6. Implementar el modelo de gestión del conocimiento en diversas organizaciones y analizar sus resultados.

## 2.3 Metodología

Se busca realizar una aproximación al tema a través de un estudio de tipo exploratorio y descriptivo. Se busca obtener una primera aproximación al tema y conocerlo en particular a través de su examen y caracterización, analizando casos y poniendo énfasis en su comprensión y, en la medida de lo posible, en temas más amplios que lo rodean [5]. Se utiliza un abordaje cualitativo ya que se busca examinar la naturaleza general de los fenómenos y contribuir a identificar los factores importantes que pueden ser medidos [6]. Los objetivos 1 y 2 se buscan cumplir a través de investigación documental "con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por (diversos) medios" [7].

Para los objetivos 3 y 4 se utilizan las tres fuentes fundamentales: observaciones del ambiente, bitácora y recolección enfocada. Específicamente para la caracterización de las pequeñas y medianas fábricas de software y la identificación de problemas asociados a la implementación de modelos de gestión del conocimiento se llevan adelante cuestionarios mixtos (considerando tanto preguntas abiertas como cerradas) y entrevistas semiestructuradas. Se incluye también la observación participante y el análisis documental. Se trabaja sobre una población seleccionada de empresas a través de un muestreo. Como afirma Hernández Sampieri [4] “lo que se busca en la indagación cualitativa es profundidad. Por lo tanto, se pretende calidad en la muestra, más que cantidad”. Mertens [8] señala que en el muestreo cualitativo se comienza con la identificación de ambientes propicios, para luego identificar grupos e individuos (si la unidad de análisis implicara individuos). Tal como se justificó anteriormente la primera decisión respecto a la muestra está asociada a la definición de un alcance que incluye pequeñas y medianas fábricas de software del Área Metropolitana de Buenos Aires. Respecto del tipo de muestreo a realizar y basado en la clasificación brindada por [9-12] se utilizará una muestra diversa o de máxima variación, “documentando diversidad para localizar diferencias y coincidencias, patrones y particularidades”. [4]

Finalmente, en la propuesta del modelo se utiliza el prototipado evolutivo experimental [13, 14] consiste en desarrollar una solución inicial para un determinado problema, generando su refinamiento de manera evolutiva por prueba de aplicación de dicha solución a casos de estudio (problemáticas) de complejidad creciente. El proceso de refinamiento concluye al estabilizarse el prototipo en evolución.

## 3. GESTIÓN DE CONOCIMIENTO

En esta sección se describen los conceptos de conocimiento (subsección 2.1) y gestión del conocimiento (2.2), se presentan modelos existentes de gestión del conocimiento (2.3) y se describen características y problemáticas de la gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software (2.4).

### 3.1 Conocimiento

El término “conocimiento” es utilizado con frecuencia, y en muchas ocasiones no se conoce su significado preciso, ni mucho menos el hecho de que existen diferentes perspectivas para definirlo. Existen dos campos epistemológicos sobre la naturaleza del término: “una perspectiva objetivista, donde se parte que el conocimiento puede ser un recurso físico tangible de la organización y otra perspectiva basada en que el conocimiento es esencialmente personal e inmerso en las prácticas individuales y organizacionales” [15].

Una de las definiciones existentes lo enmarca 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)” [16]. El término conocimiento también se puede definir como “cualquier sentencia, procedimiento u objeto que puede ser propiedad (patente, publicación) y convertirse en un recurso económico, o una mercancía en el mercado” [17]. Bajo esta definición puede afirmarse entonces que el conocimiento que se encuentre dentro de la organización puede traducirse en un valor económico.

Además, el conocimiento puede ser clasificado según diversos criterios. Una de las clasificaciones más conocidas lo divide en tácito y explícito, definiendo al tácito como aquel que es difícil de expresar, formalizar y compartir, muy personal y subjetivo, derivado de la experiencia, y al conocimiento explícito como es aquel que se puede expresar y formalizar fácilmente, por lo cual, se adquiere mediante métodos formales de estudio. Ambos tipos están presentes

en una organización, y tienen igual de importancia para la misma [18]. También se puede clasificar al conocimiento en: público (se encuentra disponible de forma fácil para cualquier persona), compartido (conocimiento comunicado a través del lenguaje y representaciones) o personal (es el conocimiento tácito que está en una persona) [19].

### 3.2 Gestión del conocimiento

Debido a la importancia del conocimiento, surge la necesidad de administrar el mismo dentro de las organizaciones para obtener los beneficios y ventajas competitivas derivadas de éste. Es aquí donde nace el término “Gestión del Conocimiento” (GC), que puede definirse 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” [15].

Según Díaz y Millán [16], las organizaciones se preocupan cada vez más por mantener el talento inmerso en sus empresas, por ende, la Gestión del Conocimiento (GC) y el Capital Intelectual (CI) se convierten en ventajas competitivas para las organizaciones modernas. Rueda Martínez [20] indica que no existe un consenso definitivo respecto del término GC y que la mayoría de las definiciones académicas se pueden clasificar en tres grupos: la GC entendida como explotación de un recurso a disposición de la organización, aquella con una perspectiva humana-productiva y la conceptualizada en base a una descripción del proceso de producción y aplicación del conocimiento.

### 3.3 Modelos de Gestión del Conocimiento

Para el desarrollo del presente trabajo se analizan diversos modelos de gestión de conocimiento y su factibilidad de implementación en las pequeñas y medianas fábricas de software del Área Metropolitana de Buenos Aires. Los modelos de gestión de conocimiento analizados son:

- Modelo de Wigg [19]: Wiig es uno de los principales precursores de la GC, y en el año 1993 propone un modelo que consta de cuatro etapas principales relacionadas al conocimiento: construir, retener, agrupar y utilizar. Cada una de las etapas contiene a su vez sub etapas y actividades bien definidas.
- Modelo de Nonaka y Takeuchi [18]: su modelo radica en la importancia de convertir el conocimiento implícito en conocimiento explícito. Para convertir el conocimiento de implícito a explícito, se siguen 4 fases principales, en un modelo permanente en espiral. Este modelo se centra en lo personal, grupal, organizacional e inter-organizacional.
- Sveiby [21]: en este modelo, los integrantes de la organización son tomados como principales actores. Se basa en la transferencia de conocimiento entre 9 aspectos de la organización y para cada aspecto existe una pregunta estratégica que debe ser respondida.
- Modelo de Earl [22]: propuso un modelo de GC dividido en lo que él llama “escuelas de gestión del conocimiento”. Cada escuela del modelo de Earl tiene una filosofía y ésta indica hacia donde se orienta la escuela, es decir, qué es lo que se busca al aplicarla.
- Kerschberg [23]: propone un modelo para gestionar el conocimiento, teniendo en cuenta que el mismo puede provenir de fuentes heterogéneas. Este modelo está basado principalmente en aspectos tecnológicos y el uso de capas de presentación, procesamiento y datos.
- Bustelo y Amarilla [24] proponen 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).
- CEN (Comité Europeo de Estandarización) [25]: publica un modelo de GC llamado “Guía de buenas prácticas en gestión del conocimiento”. A pesar de ser llamado guía de buenas prácticas, por su estructura se puede considerar como un modelo. Este es uno de los modelos más utilizados actualmente [26]. Consta de tres capas principales: foco de negocios, actividades centrales, facilitadores.
- Bovea y García [27]: toma como base la teoría de la complejidad, y lo aplica a lo que los autores consideran como un modelo complejo: el desarrollo de fábricas de software. Este modelo propone etapas para el desarrollo de software y trata de explicar cómo debería fluir el conocimiento en cada una de estas etapas. No parece ser directamente un modelo de GC sino un modelo de funcionamiento de una fábrica de software, en donde se toman en cuenta los flujos de conocimiento. Las etapas que plantea el modelo son iterativas, es decir, se pueden repetir para adecuarse a la reutilización de paquetes de software y por ende del conocimiento.
- Mc Elroy [28]: el modelo incluye dos actividades principales: la producción del conocimiento y la integración del mismo. La primera implica todas aquellas actividades necesarias para crear nuevo conocimiento. La segunda, aquellas actividades necesarias para integrar el conocimiento nuevo a las bases de conocimiento existentes en la organización.
- ISECO [29]: este modelo de GC fue creado para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos. Las etapas que define este modelo se implementan de manera cíclica y son: interiorización, socialización, exteriorización, combinación y control.

### 3.4 La gestión del conocimiento en las pequeñas y medianas fábricas de software

El término Software Factory (SF) emerge por primera vez entre los años 60 y 70, en Estados Unidos y Japón, pero no es sino hasta los años 90, en donde se comienza a dar forma a este concepto [30]. No existe una definición unificada de lo que es, o lo que representa, una SF, sin embargo, con base en conceptos y caracterizaciones referentes a las fábricas de software (Software Factory, SF) de autores como Nomura y otros [31], Santos y Soares [32], Fernstrom y Narfelt [33] y Greenfield y Short [34], se puede inferir que una SF es un modelo de referencia, plantilla o forma de trabajo, que se puede aplicar en empresas que desarrollan productos de software, basado en equipos de trabajo multidisciplinarios, conformados por profesionales especializados, con roles y responsabilidades claras, que siguen procesos bien definidos, para producir una familia de productos de software. Rus y Lindvall [35] detallan problemas o desafíos que presenta la Gestión del Conocimiento en la industria del software:

- La tecnología cambia constantemente y todos los días se produce conocimiento nuevo, además es necesario buscarlo fuera de los límites de la organización;
- Cada proyecto de software es diferente, tiene un contexto diferente y los procesos pueden variar de un proyecto a otro y las personas involucradas en el desarrollo de software a menudo están expuestas a esta diversidad;
- El desarrollo de software no sólo necesita conocimiento sobre su propio dominio, sino sobre el dominio para el cual se realizan los productos, por lo cual adquirir la experiencia y el conocimiento necesario para cada proyecto toma un tiempo largo;
- Los desarrolladores de software necesitan tener conocimiento muy específico acerca de las convenciones locales de desarrollo, este conocimiento se maneja como un "folklore" de manera informal;
- Dentro de una organización de desarrollo de software, es necesario saber "quién sabe qué cosa", esto reduce los tiempos necesarios para buscar expertos que ayuden en alguna tarea. Además, ayuda a los empleados a conocer la importancia de sus conocimientos;
- El desarrollo de software de gran tamaño es una actividad grupal y la división del trabajo en fases significa a menudo que varios grupos se involucran en el proceso de desarrollo; además con la globalización es posible que estos grupos diversos estén en locaciones geográficas y zonas horarias diferentes;
- El conocimiento en la industria del software es mayormente implícito, y no se vuelve explícito en primera instancia por la falta de tiempo;
- El conocimiento es altamente especializado, por lo cual es difícil de formalizar.

Otro de los desafíos que se suma a la lista anterior es que la alta rotación de personal en el rubro ocasiona que el conocimiento sea más volátil [1]. Además, las posibilidades de que los proyectos fracasen o se cancelen son elevadas, por lo cual se debe registrar también qué cosas no se deben hacer para que el proyecto tenga éxito [1]. Sumado a todo esto, dentro de la Ingeniería de Software existen proyectos globales, con grupos divididos en locaciones geográficas diferentes y "las distancias temporales y geográficas afectan en primera instancia la habilidad para compartir y acceder al conocimiento, mientras que las distancias socioculturales introducen desafíos para unificar las formas en que el conocimiento se comparte y mantiene" [36].

Las fábricas de software que pertenecen a la categoría de pequeñas y medianas empresas además incorporan las problemáticas asociadas a este tipo de organizaciones, tales como dificultades en la identificación y acceso a la tecnología adecuada, limitaciones técnicas y competitivas que imponen las escalas de producción, deficiente infraestructura física, falta de asociatividad empresarial, carencia de directivos con capacidad gerencial y pensamiento estratégico y, dificultad de cimentar la articulación del sector con la gran empresa y con los sistemas de compras estatales [37, 38]. Di Ciano afirma además que "las Pymes [N. de A.: Pequeñas y Medianas Empresas] en su mayoría son altamente volátiles, con altas tasas de nacimientos e inestabilidad, dado que las empresas nacen pequeñas (son pocas las firmas que nacen con gran volumen) y los decesos se producen generalmente en los primeros años de vida", tienen insuficiente delegación y mala distribución de tareas, vaga definición de dos aspectos fundamentales para toda organización: la misión y la visión y presentan falta de formación de los gerentes [39].

## 4. PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO

En esta sección se presenta un modelo de gestión del conocimiento. En primer lugar, se describen algunas generalidades del mismo, luego la estructura del modelo, las actividades previas requeridas para su implementación, las etapas del modelo y las actividades vinculadas al mantenimiento del mismo.

### 4.1 Generalidades

Este modelo tiene como base actividades y/o etapas propuestas en los modelos de Earl, Mc. Elroy, ISECO y CEN, que se irán nombrando a medida que se explique la propuesta. Está diseñado para ser aplicado en SF, teniendo en cuenta los desafíos de GC que existen en este rubro y han sido detallados durante etapas anteriores. El modelo está pensado para ser compatible con metodologías de desarrollo tanto ágiles (ya que las reuniones que propone pueden ser una prolongación de determinadas reuniones o ceremonias que forman parte de este tipo de metodologías) como

tradicionales. Es un modelo cíclico paralelo al proceso de desarrollo de software (al igual que en el modelo ISECO), sin interferir de manera agresiva en las actividades normales del equipo y la organización, es decir, sin consumir mucho tiempo y esfuerzo de los recursos.

Al igual que el modelo de Mc. Elroy, este modelo se centra en buscar espacios vacíos de conocimiento para crear conocimiento sólido, acompañando el trabajo diario de los individuos. Se utiliza en parte este modelo como base, porque es la forma más fácil de adaptar un modelo a los tiempos reducidos que existen en una SF y generar conocimiento realmente importante para el trabajo de la organización. Sin embargo, de este modelo es tomada la idea principal solamente, puesto que está formado por muchas etapas, actividades y validaciones que podrían complicar el trabajo de los individuos de una SF.

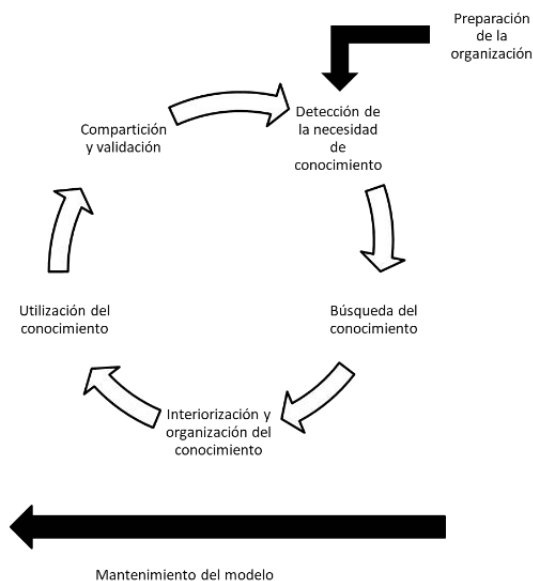
Al igual que el modelo de Mc. Elroy, el modelo propuesto comienza con la detección de una necesidad de conocimiento y termina con el conocimiento formalizado en la base de conocimientos, sin embargo, no solo queda en la base de conocimientos, sino también interiorizado en otros miembros de la organización (esto reduce la volatilidad del conocimiento que podría producir la alta rotación de personal). Se considera como base de conocimientos, aquellos medios internos de los cuales se puede obtener conocimiento, como lo son: la wiki de conocimientos, correos electrónicos, intranet o web interna y documentos internos. Esta base de conocimientos es similar a la presentada en el modelo de Kerschberg.

Es importante mencionar que el modelo CEN también comienza con la identificación de la necesidad de conocimiento y la búsqueda del mismo evitando siempre la redundancia, sin embargo, no se centra en una necesidad en particular detectada por un individuo de la organización.

A diferencia de otros modelos como el modelo CEN, este modelo propone que el conocimiento sea compartido (al menos con el mismo equipo de trabajo) antes de formalizarlo. De esta manera el conocimiento puede ser validado por los demás miembros del equipo, ampliado y mejorado antes de ser llevado a la base de conocimientos.

## 4.2 Estructura del modelo

El modelo que se propone (Figura 1) posee cinco etapas principales, cíclicas y continuas: detección de la necesidad de conocimiento, búsqueda de conocimiento, organización e interiorización, utilización, compartición y validación y formalización. Además, existe una primera etapa que implica preparar a la organización para la aplicación del modelo y una etapa transversal a todo el modelo y de ejecución continua que implica el mantenimiento del modelo.



**Figura 1.** Modelo propuesto

## 4.3 Preparación de la organización para la aplicación del modelo

Durante esta fase se designa el comité de GC de la organización, se determina qué elementos conforman la base de conocimientos y se busca ponerlos a disposición de todos los miembros de la organización y se diseña y crea la base de conocimiento. Las actividades que componen esta etapa son:

- Seleccionar el comité de Gestión del conocimiento: la organización debe seleccionar a una o más personas (dependiendo de las necesidades de cada caso), para integrar este comité.
- Determinar qué elementos pertenecen a la base de conocimientos y garantizar una forma en la que los miembros de la organización tengan acceso a este material.
- Crear o adquirir los elementos pertenecientes a la base de conocimiento.
- Capacitar a los equipos existentes en cuanto a la aplicación del modelo.

#### 4.4 Etapas cíclicas del modelo

- *Detección de la necesidad de conocimiento.* Esta etapa inicia el ciclo del modelo, se da cuando una persona del equipo (en adelante, el interesado) detecta que existe una necesidad de conocimiento importante que puede ser un bloqueo para realizar su trabajo o para el trabajo de otros compañeros del equipo. Se puede afirmar que a partir de esta etapa el modelo propuesto presenta similitudes con los procesos de mejora continua dentro de la gestión de calidad en las organizaciones. Bhuiyan y Amit [40] definen al proceso de mejora continua como una cultura de mejora sostenida que apunta a la eliminación del desperdicio en todos los sistemas y procesos de una organización. Involucra el trabajo de todos los miembros de la organización para hacer mejoras sin necesidad de grandes inversiones de capital. Para los mencionados autores, el proceso de mejora continua puede ocurrir por cambios evolutivos, en cuyo caso las mejoras son incrementales. Se puede observar a lo largo de este modelo, que la suma de conocimiento a la organización mediante la detección de una necesidad del mismo, de forma cíclica, es similar a lo que el proceso de mejora continua supone.
- *Búsqueda del conocimiento.* El interesado debe recurrir a las fuentes internas de conocimiento pertenecientes a la organización para buscar el conocimiento necesitado, si no lo consigue de esta manera, entonces debe recurrir a fuentes externas. La idea de buscar el conocimiento en fuentes internas, en primera instancia, no es solo para ahorrar tiempo, sino que también, de esta manera, se puede reutilizar el conocimiento existente y evitar la redundancia. Si el conocimiento fue encontrado en una fuente externa a la organización, el empleado debe utilizar su criterio para determinar la importancia de formalizar este conocimiento dentro de la organización. Es decir, debe preguntarse: ¿es este conocimiento difícil de encontrar en una fuente externa?, ¿es importante realmente que la organización cuente con este conocimiento en la wiki de conocimientos? ¿Cuándo otra persona tenga la misma necesidad de conocimiento, la puede resolver más rápido consultando fuentes internas? Si la respuesta a alguna de estas preguntas es SI, entonces se debe continuar con la siguiente actividad de esta fase, si la respuesta a todas las preguntas es NO, entonces no se continúa con las demás fases del modelo.
- *Interiorización y organización del conocimiento.* El interesado debe, una vez encontrado el conocimiento, organizar la información adquirida e interiorizarla. Si el conocimiento no está formalizado en la base de conocimiento y tiene dudas de que este nuevo conocimiento esté correcto en primera instancia antes de continuar con su trabajo, debe consultarlo con líderes y otros miembros de la organización (validación en primera instancia). Esta etapa puede ser comparada con la etapa de Interiorización del modelo ISECO. Las actividades propuestas para esta etapa son:
  - Consultar con líderes: en caso de que existan dudas sobre la veracidad de la información encontrada, debe consultar con sus líderes más directos, los cuales, aunque no posean conocimiento del tema pueden validar las fuentes de donde fue adquirido.
  - Organizar la información encontrada: debe organizar la información encontrada de modo que sea lo más fácil posible de interiorizar y convertir en conocimiento.
  - Interiorizar la información adquirida: debe interiorizar la información para convertirla en conocimiento que pueda ser utilizado en la siguiente fase, esta actividad puede realizarse en forma simultánea a la anterior. Se recomienda conversar sobre el tema encontrado con otro miembro del equipo para facilitar el proceso de interiorización.
- *Utilización del conocimiento.* La siguiente etapa implica utilizar el conocimiento para seguir realizando las tareas, tomando nota de los puntos más importantes de lo aprendido, para poder llevar a cabo las siguientes etapas de este modelo cuando sea el momento. Esta etapa se puede considerar una extensión de la etapa de interiorización del modelo ISECO, ya que la persona debe tomar registro de su experiencia utilizando este conocimiento para darle forma al mismo y tenerlo en cuenta a la hora de compartir y externalizar el conocimiento. Es importante observar que esta etapa de utilización antecede a su validación. En este aspecto reside una de las características fundamentales de este modelo, donde el interesado resulta el primer validador del valor de dicho conocimiento.
- *Compartición y validación.* En esta etapa se vincula la gestión del conocimiento con las metodologías de desarrollo ágiles. Según [41] las metodologías ágiles para el desarrollo de software han sido implementadas para disminuir el tiempo de desarrollo a través de un modelo iterativo e incremental, en negocios donde los requerimientos son relativamente inestables, es decir que pueden cambiar sobre la marcha. Estas metodologías han sido desarrolladas además para incrementar la satisfacción del cliente, reducir la cantidad de errores y reflejar en el resultado final las necesidades de cambio en la organización que ocurren durante el desarrollo del producto. En [42] se afirma que las metodologías ágiles promueven las relaciones y comunicación entre los miembros de un equipo de desarrollo de software, generando relaciones cercanas, espíritu de equipo y buen ambiente de trabajo, además de promover la cooperación entre el equipo y el cliente. Este tipo de relaciones y espíritu de equipo puede ayudar a facilitar el proceso de GC.

La idea principal de esta etapa del modelo es que en una ceremonia periódica de las metodologías ágiles (por ejemplo, la reunión retrospectiva de Scrum), cada miembro del equipo comparta con los demás el conocimiento adquirido y utilizado durante el ciclo de la metodología. Se recomienda la reunión retrospectiva (si se usa Scrum), ya que su propósito es hablar de lo que se debe mejorar y de lo aprendido durante el sprint, sin embargo, se puede

sumar esta fase a cualquier ceremonia o reunión de una metodología ágil, a criterio de la organización. Si no se utilizan metodologías ágiles, se debe entonces establecer una reunión periódica (no más de un mes de diferencia entre ellas, para evitar que se pierda el conocimiento adquirido) para realizar esta actividad. En esta reunión, cada persona comparte lo aprendido y describe la forma en que se utilizó. Los demás miembros del equipo pueden intervenir para darle forma al conocimiento y añadir ideas de ser necesario. Así mismo, se valida definitivamente este conocimiento entre todos los miembros del equipo y se determina la importancia de formalizarlo. Esta etapa podría compararse con las etapas de socialización, externalización y combinación del modelo ISECO. También con la etapa de compartir conocimiento del modelo CEN.

- *Formalización.* Una vez compartido y validado el conocimiento por los miembros del equipo, el conocimiento debe ser formalizado, es decir, llevado a las bases de conocimiento. Luego de formalizarse el conocimiento, si éste es de suma importancia para el resto de la organización, se pueden organizar charlas que involucren a otros equipos (por ejemplo: charlas técnicas). Debe existir también un calendario disponible para todos los miembros de la organización con los detalles de cada una de las charlas planificadas, este calendario se debe actualizar cada vez que se planifica una nueva charla informativa, los detalles de este documento se explican más adelante.

#### **4.5 Mantenimiento del modelo**

El modelo debe llevar un mantenimiento y control periódico para que su aplicación pueda ser prolongada en el tiempo. Algunas de las actividades de esta fase no dependen una de otra, por lo que pueden ser llevadas a cabo en cualquier orden:

- Resguardo de la base de conocimiento, considerando todas las tecnologías que hubieran sido aplicadas;
- Recepción de oportunidades de mejora al proceso;
- Análisis e implementación de mejoras;
- Reconocimiento a los generadores de conocimiento: se recomienda que la aplicación del modelo sea incentivada con premios o reconocimientos a las personas que tengan mayor grado de participación en la construcción de información y conocimiento.

#### **5. CONCLUSIONES**

La gestión del conocimiento ha tomado gran relevancia en las sociedades modernas y sus organizaciones. Sin embargo, las empresas han mostrado dificultades para la implementación de modelos de gestión del conocimiento exitosos.

En este trabajo se analizan diversos modelos y se plantea una aproximación a un nuevo modelo, partiendo de los ya existentes, adaptable a las fábricas de software que pertenecen al conjunto de las pequeñas y medianas empresas. Este modelo contiene una etapa de organización, 5 etapas cíclicas (detección de la necesidad del conocimiento, búsqueda del conocimiento, interiorización y organización, utilización y compartición y validación) y una etapa de mantenimiento.

En próximos trabajos se prevé avanzar con la especificación de este modelo, sus actividades detalladas y las herramientas requeridas.

## REFERENCIAS

- [1] Aurum, A. et al. (2013). *Managing software engineering knowledge*. Springer.
- [2] Motta, J., Morero, H. & Borrastero, C. (2016). *La política industrial en el sector de software de Argentina durante los años 2000*. Universidad de San Andrés.
- [3] UTN-FRBA (2018). *La gestión del conocimiento en pequeñas y medianas fábricas de software en el área metropolitana de Buenos Aires*. Proyecto de Investigación y Desarrollo (PID). Universidad Tecnológica Nacional, Regional Buenos Aires.
- [4] Hernández, R. et al. (2006). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill.
- [5] Alonso, G. (2003). *El estudio de caso simple. Un diseño de investigación cualitativa*. Serie Metodología de la Investigación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- [6] Van Dalen, D. & Meyer, W. (1994). *Manual de técnica de la investigación educacional*. Paidós.
- [7] UPEL (2005). *Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*. Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- [8] Mertens, D. (2005). *Research and evaluation in Education and Psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods*. Sage.
- [9] Miles, M. & Huberman, A. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook*. Sage.
- [10] Miles, M. & Huberman, A. (1994). *Tipology of sampling strategies in qualitative inquiry: A source of new methods*. Sage.
- [11] Creswell, J. (1998). *Qualitative inquiry and research designs: Choosing harmony among five traditions*. Sage.
- [12] Creswell, J. (2005). *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative Research*. Pearson.
- [13] Basili, V. (1993). *The Experimental Paradigm in Software Engineering*. Lecture Notes in Computer Science 706.
- [14] Ko, A., LaToza, T. & Burnett, M. (2015). *A practical guide to controlled experiments of software engineering tools with human participants*. *Empirical Software Engineering* 20(1), 110-141.
- [15] Pérez, V. & Urbáez, M. (2016). *Modelos teóricos de gestión del conocimiento: descriptores, conceptualizaciones y enfoques*. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*.
- [16] Díaz, M. & Millán, J. (2013). *Gestión del Conocimiento y Capital Intelectual, a través de modelos universitarios*. *Económicas*.
- [17] Nonaka, I. & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press
- [18] Wiig, K. (1993). *Knowledge Management Foundations: Thinking about thinking – How people and organizations create, represent, and use knowledge*. Schema.
- [19] Rueda, M. (2014). *La gestión del conocimiento y la ciencia de la información: Relaciones disciplinares y profesionales*. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III.
- [20] Sveiby, K. (2001). *A knowledge-based theory of the firm to guide in strategy formulation*. *Journal of intellectual capital* 2(4), 344-358
- [21] Earl, M. (2001). *Knowledge management strategies: Toward a taxonomy*. *Journal of management information systems* 18(1), 215-233.
- [22] Kerschberg, L. (2001). *Knowledge management in heterogeneous data warehouse environments*. In *International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery*.
- [23] Bustelo, C. & Amarilla, R. (2001). *Gestión del conocimiento y gestión de la información*. *Inforárea* 2001 8(34), 226-230
- [24] CEN (2004) *CEN CWA 14924 European Guide to good Practice in Knowledge Management - Part 1 to 5*, Brussels
- [25] Pawlowski, J. & Bick, M. (2015). *The global knowledge management framework: Towards a theory for knowledge management in globally distributed settings*. *Lead. Issues Knowl. Manag.* 2(2), 134-139.
- [26] Bovea, T. & García, V. (2011). *Modelo de gestión del conocimiento aplicado a un sistema complejo: Desarrollo de fábricas de software*. Ninth Latin American and Caribbean Conference.
- [27] McElroy, M. (2003). *The new knowledge management: complexity, learning and sustainable innovation*. Butterworth.
- [28] Pons, N. Et al. (2014). *Diseño de un modelo de Gestión del Conocimiento para mejorar el desarrollo de equipos de proyectos informáticos*. *Revista Española de Documentación Científica* 37(2), 44-52.
- [29] Cusumano, M. (1989). *The software factory: a historical interpretation*. *IEEE Software Magazine* 3, 23-30.
- [30] Nomura, L. et al. (2007). *A model for defining software factory processes*. In *19th International Conference on Production Research*.
- [31] Santos, S. & Soares, F. (2013). *Authentic assessment in software engineering education based on PBL principles: A case study in the telecom market*. In *2013 International Conference on Software Engineering*.
- [32] Fernstrom, C., Narfelt, K. & Ohlsson, L. (1992). *Software factory principles, architecture, and experiments*. *IEEE Software* 9(2), 36-44.
- [33] Greenfield, J. & Short, K. (2003). *Software factories: Assembling applications with patterns, models, frameworks and tools*. *ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications*.
- [34] Rus, I. & Lindvall, M. (2002). *Knowledge management in software engineering*. *IEEE software* 19(3), 26-38.
- [35] Dingsoyr, T. & Smite, D. (2014). *Managing knowledge in global software development projects*. *IT Profess.* 16(1), 22-29.
- [36] Sánchez, J. (2007). *Algunas aproximaciones al problema de financiamiento en las PYMES de Colombia*. *Ciencia y Técnica* 13(34), 321-32
- [37] Marulanda, C., López, M. & Mejía, M. (2013). *Análisis de la gestión del conocimiento en PYMES de Colombia*. *Revista Gerenc. Technol. Inform.* 12(33), 33-43.
- [38] Di Ciano, M. (s.f.) *Pymes. Rol de la Economía Nacional y características particulares de funcionamiento*.
- [39] Bhuiyan N. & Baghel, A. (2005). *An overview of continuous improvement: from the past to the present*. *Management Decision* 43(5), 761-771.
- [40] Manchanda, H. et al. (2017). *Agile Methods for Software Development*. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(6), 14-21.
- [41] Abrahamsson, P. et al. (2002). *Agile software development methods: Review and analysis*. Espoo: VTT publication.

En los últimos años, áreas como la medicina, la bio-informática y la geo-informática han impulsado el enriquecimiento de los modelos conceptuales para bodegas de datos. Estos modelos se han enriquecido con elementos pictóricos (iconos) que permiten describir con mayor precisión las variables de estas áreas. En este capítulo, se presentan y comparan distintos modelos conceptuales para bodegas de datos que han sido enriquecidos con este tipo de elementos. Además, se identifican áreas o problemas para los cuales no existen modelos conceptuales especializados para bodegas de datos, i.e., que carecen de iconos deseables para la representación de los conceptos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos conceptuales *convencionales* para Bodegas de Datos (BD) [1] carecen de elementos pictóricos (iconos) especializados que faciliten la representación de aspectos inherentes de dominios como la medicina, la bioinformática y la geo-informática, entre otras [4]. En particular, los avances tecnológicos de la última década han impulsado la geoinformática [5]. Por ejemplo, los dispositivos móviles suelen disponer de sistemas de geolocalización, los cuales generan datos sobre la ubicación de un objeto (una persona, un animal, un vehículo) con una determinada frecuencia (e.g., cada cinco segundos). Los modelos conceptuales enriquecidos para BD en dominios como la geo-informática [6] suelen incluir iconos como puntos, líneas o polígonos que representan objetos del mundo real tales como el sitio donde está ubicado un semáforo (latitud y longitud), una vía o la región que delimita un barrio.

Por otro lado, las BD *espacio-temporales* propician el análisis del movimiento de objetos móviles, i.e., el análisis de sus trayectorias [7]. Una trayectoria se puede representar mediante una secuencia de puntos (latitud, longitud, altitud y tiempo) ordenados ascendentemente según el tiempo [8]. El análisis de trayectorias suele incluir aspectos como la velocidad, los sitios visitados por el objeto móvil, la distancia recorrida, la orientación (norte, sur), entre otros. Por ejemplo, en [9] se presenta una aplicación médica para el análisis de trayectorias de ambulancias. Los autores establecen como sitios de interés aquellos donde se detienen las ambulancias, e.g., el sitio donde se recoge un herido o el hospital donde este es llevado; además se analiza la velocidad promedio de las ambulancias y las vías que suelen usar para sus recorridos. Por su parte, en [10] se propone un modelo conceptual enriquecido para una BD con iconos para representar los diferentes tipos de dimensiones para el análisis de trayectorias de ambulancias, i.e., cada dimensión se representa con un icono distintivo, e.g., la dimensión temporal se representa con un plano cartesiano y un reloj mientras que la dimensión espacial (geográfica) se representa con un plano cartesiano y un polígono.

En este capítulo se analizan diferentes modelos conceptuales enriquecidos (con iconos) para BD. El objetivo es doble: a) presentar un panorama actual sobre el tipo de extensiones (enriquecimientos) que han sido propuestas, su utilidad y el dominio al cual están dirigidos y b) identificar áreas o problemas para los cuales no existen modelos conceptuales de BD especializados, i.e., carecen de iconos deseables para la representación de determinados conceptos.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE BD

Inmon [2] y Kimball [3] son considerados los padres de las BD. Una BD es una base de datos especializada para soportar la toma de decisiones y usualmente se modela mediante una visión multidimensional de los datos [11]. Las fuentes de datos de una BD suelen ser bases de datos transaccionales [12]. Los datos que van a ser almacenados en la BD se someten a un proceso conocido como ETL (*extract, transform, and load*), i.e., extracción, transformación y carga [13]. El objetivo de este proceso es estandarizar y estructurar, en la BD, los datos provenientes de las diferentes fuentes de datos.

### 2.1 Modelos conceptuales de BD

Los modelos conceptuales convencionales para BD [3] suelen representar los hechos y las dimensiones mediante dos esquemas, estrella (*star*) y copo de nieve (*snowflake*).

- *Esquema en estrella*. En este esquema, los datos de cada dimensión se almacenan en una sola tabla. Es decir, desde el punto de vista de una base de datos relacional, la tabla que almacena los datos de una dimensión suele tener un grado de normalización bajo (e.g., primera o segunda forma normal). Un ejemplo se muestra en la Figura 1. Allí se tiene el ejemplo típico de una BD con el hecho Ventas y las dimensiones Cliente, Tiempo, Tienda y Producto.

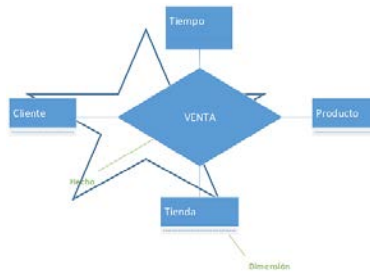
---

<sup>1</sup> [anfcadavidag@unal.edu.co](mailto:anfcadavidag@unal.edu.co)

<sup>2</sup> [fjmoreno@unal.edu.co](mailto:fjmoreno@unal.edu.co)

<sup>3</sup> [jaguzman@unal.edu.co](mailto:jaguzman@unal.edu.co)





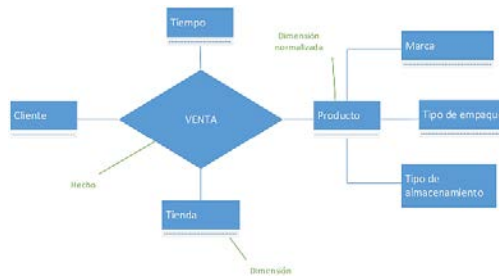
**Figura 1.** Esquema en estrella

Por ejemplo, la dimensión Producto se almacena en una tabla con la estructura mostrada en la Figura 2.

Producto
Código producto (PK)
Número producto
Descripción producto
Tipo marca
Categoría
Departamento
Tipo de empaque
Indicador abrasivo
Tamaño
Tamaño por unidad
Tipo de almacenamiento
Tipo ciclo de vida
Ancho estante
Alto estante
Profundidad estante
....

**Figura 2.** Dimensión Producto. Modificado a partir de [3]

- *Esquema en copo de nieve.* En este esquema se normalizan las dimensiones. De esta forma, una dimensión se implementa usualmente mediante varias tablas (una para cada nivel de la dimensión) [3]. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Esquema en copo de nieve

Aquí, a diferencia de la dimensión Producto de la Figura 1, los niveles que componen a esta dimensión se hacen explícitos y cada uno requerirá una tabla. La Figura 4 detalla la estructura de la dimensión Producto (normalizada) en un esquema en copo de nieve.



**Figura 4.** Dimensión Producto, esquema en copo de nieve. Modificado a partir de [3]

### 3. MODELOS CONCEPTUALES ENRIQUECIDOS PARA BD

Como se expresó antes, los modelos conceptuales convencionales para BD carecen de iconos especializados que faciliten la representación de aspectos de determinados dominios. Por ejemplo, se ha estimado que un 80% de los datos almacenados en una BD contienen componentes espaciales [7]. Esto ha impulsado el enriquecimiento de los modelos conceptuales para BD con iconos para representar este tipo de datos. Malinowski y Zimányi [6] incorporan iconos para representar tipos de datos espaciales y relaciones topológicas a un modelo conceptual multidimensional con medidas (las medidas hacen parte de los hechos) y dimensiones espaciales. Los iconos son tomados de [14] (Figura 5).

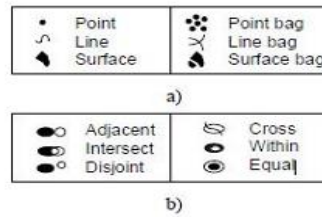


Figura 5. Iconos espaciales: (a) tipos de datos y (b) relaciones topológicas [5]

La Figura 5a muestra los iconos (tipos de datos espaciales) para representar objetos espaciales. Estos son un punto, una línea, una superficie (región, polígono), un conjunto de puntos, de líneas y de superficies. La Figura 5b muestra los iconos para representar las relaciones topológicas entre los objetos espaciales. Estas son adyacencia (*adjacent*), intersección (*intersect*), disyunción (*disjoint*), cruce (*cross*), inclusión (*within*) e igualdad (*equal*). Por ejemplo, sean dos niveles City (Ciudad, representada con una superficie) y State (Estado, representado con un conjunto de superficies) de una dimensión geográfica. Entre estos niveles existe una relación espacial (*within*) que indica que una ciudad (superficie) está incluida (dentro, *within*) de un estado (conjunto de superficies). En la Figura 6 se muestra un ejemplo del modelo de Malinowski y Zimányi [6].

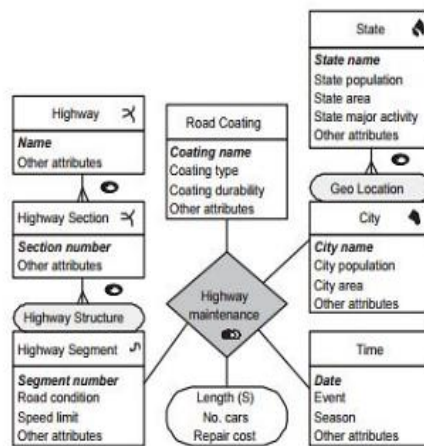


Figura 6. Modelo multidimensional para el análisis de mantenimiento de carreteras (*Highway maintenance*) [6]

De esta forma, los iconos ayudan a representar con más precisión la situación del mundo real, e.g., un segmento de una carretera (*Highway segment*, línea) pertenece a una sección de una carretera (*Highway section*, conjunto de líneas) y esta a su vez a una carretera (*Highway*, conjunto de líneas); una ciudad (superficie) está incluida en un estado (conjunto de superficies). Por su parte, la relación topológica intersección en el hecho (*Highway maintenance*), establece que entre la ciudad y el segmento de una carretera asociados con un mantenimiento debe haber intersección.

Campora et al. [15] presentan un marco de trabajo (*framework*) para el diseño de BD que incluyan conceptos espacio-temporales. Se presenta como caso de estudio una BD de trayectorias para el análisis del tráfico, donde se consideran las relaciones espaciales entre las trayectorias y los sitios de interés (e.g., restaurantes, supermercados, entre otros). Para los autores una trayectoria no es solo un conjunto de puntos espacio-temporales, sino un objeto semántico con identidad, el cual contiene sub-objetos semánticos denominados episodios (e.g., detenciones (*stops*) en los sitios de interés y desplazamientos (*moves*) entre estos sitios) [16]. La Figura 7 muestra el esquema propuesto por los autores donde se usa la notación de Malinowski y Zimányi [6, 19].

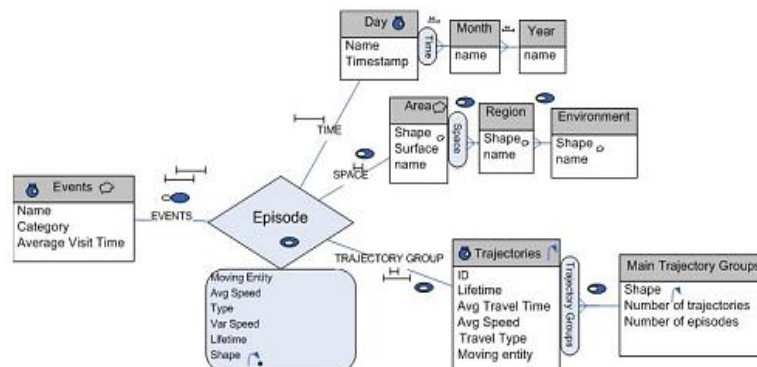


Figura 7. BD de episodios (*Episodes*) [15]

Además de las relaciones topológicas presentadas en la Figura 5-b, se incluyen iconos (en forma de segmentos de recta) para representar relaciones temporales (e.g., el tiempo de ocurrencia de un episodio (*Episode*) debe coincidir total o parcialmente con el tiempo de ocurrencia de un evento (*Event*); el tiempo de ocurrencia de un episodio debe estar dentro del tiempo de ocurrencia de una trayectoria (*Trajectory*)) e iconos para representar las trayectorias. En Oueslati y Akaichi [10] se crea un perfil UML (un perfil UML permite personalizar modelos UML para dominios particulares) llamado Trajectory-UML con el objetivo de mejorar el modelamiento de trayectorias y de BD de trayectorias. Se incluyen estereotipos, iconos y restricciones del diagrama de clases y de secuencia de UML. Los estereotipos son elementos de texto que permiten definir las categorías (del dominio) de los objetos de un modelo. La Figura 8 muestra los estereotipos e iconos usados. Estas combinaciones facilitan, e.g., la distinción entre los diferentes tipos de dimensiones (espacial, temporal).

Stereotypes	Icons
<<trajectoryFact>>	
<<Dimension>>	
<<TemporalDimension>>	
<<SpatialDimension>>	
<<DimensionLevel>>	

Figura 8. Estereotipos e iconos usados en el esquema de una BD [10]

La Figura 9 muestra un (fragmento) de un modelo (sobre trayectorias de ambulancias), que combina el diagrama de clases de UML con los estereotipos e iconos mostrados. Jenhani y Akaichi [9] extienden el trabajo de [10] con estereotipos e iconos para representar conceptos como episodios, detenciones (*stops*), desplazamientos (*moves*), objetos en movimiento (ambulancias), actores (personal médico) y sitios de interés; véase la Figura 10. Además, se representa una trayectoria mediante tres niveles de abstracción: semántico (*semantic*), estructurado (*structured*) y no-refinado (*raw*). Cada nivel permite capturar características del mundo real que deben ser consideradas en los modelos conceptuales; un ejemplo se muestra en la Figura 11.

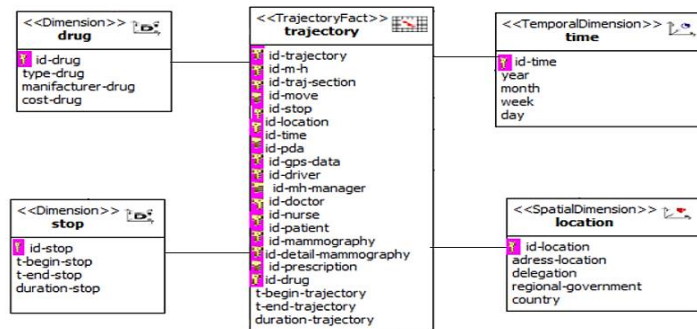


Figura 9. Fragmento de un modelo conceptual para una BD de trayectorias de ambulancias [10]

Element	Stereotype	Icon
Trajectory	<<Trajectory_Fact>>	
Ambulance	<<Moving_Object Dim>>	
Episode	<<Episode_Dim>>	
Stop	<<Stop_Dim>>	
Move	<<Move_Dim>>	
Date	<<Time_Dim>>	
Patient, Doctor, Nurse	<<Actor_Dim>>	
Point of interest, Medical institution, Break-down point, Amb_services center, Location of incident	<<PoinOfInterest_Dim>>	
Roads Network	<<LineOfIntererest_Dim>>	
Region	<<RegionOfInterest_Dim>>	
Crew, Medical staff,	<<Dimension>>	

Figura 10. Extensiones para la representación semántica de trayectorias [9]

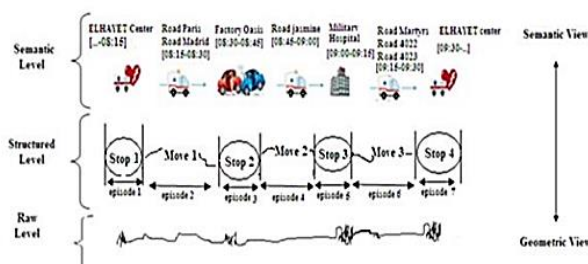


Figura 11. Representación en niveles de abstracción de una trayectoria [9]

El primer nivel es el no-refinado, es el más abstracto. Allí, la trayectoria se percibe como un conjunto de puntos espaciales  $(x,y)$  asociados con un tiempo  $(t)$ . El segundo nivel es el estructurado, es el puente (nivel intermedio) entre el nivel no-refinado y el nivel semántico. Aquí, la trayectoria se percibe como un conjunto de episodios (detenciones (*stops*) y desplazamientos (*moves*)), según la propuesta de [17]. El tercer nivel es el semántico. Aquí, se especifica para cada episodio el espacio (geográfico) donde ocurre; además se especifica el tiempo, los objetos implicados (e.g., ambulancias) y las actividades (e.g., recoger un herido, llegada a un hospital) ejecutadas.

En Arigon et al. [4] se plantea un modelo multidimensional para datos multimediales (imágenes o señales) multiversionando las dimensiones (i.e., para una misma dimensión existen varias versiones de esta; esto permite comparar las medidas) En los modelos conceptuales para BD, los autores usan la representación multimedial del objeto a analizar en los hechos como se observa en la Figura 12, donde se usa un icono en el interior del rombo para representar un electrocardiograma. Otro ejemplo se muestra en la Figura 13, donde se usa un icono representativo del genoma humano, además se incluyen polígonos para abarcar los niveles de cada una de las dimensiones, lo cual facilita su identificación.

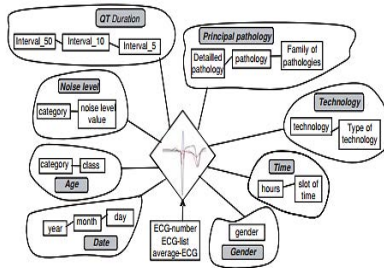


Figura 12. Modelo conceptual para una BD de electrocardiogramas [4]

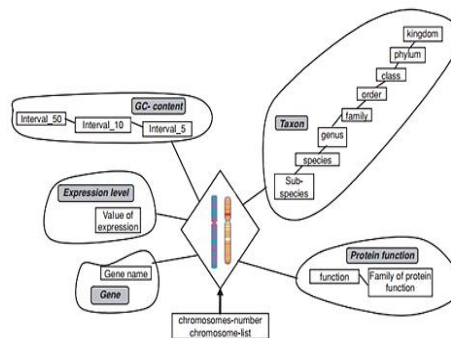


Figura 13. Modelo conceptual para una BD de bioinformática [4]

En Wagner et al. [5] se propone un método narrativo llamado 5W1H el cual explica sistemáticamente el contexto que involucra un problema. El método plantea seis preguntas narrativas (*narrative questions: Who, What, When, Where, Why y How*) por medio de las cuales se trata de modelar un problema. El método está orientado al modelamiento de trayectorias. Cada pregunta narrativa del modelo 5W1H se correlaciona con una característica específica de una trayectoria. Así, un objeto (*Who*) se puede desplazar mediante algún medio de transporte o tener algún comportamiento (*How*) y este ejecuta una actividad (*What*), por una razón (*Why*), en un momento (*When*) y en un lugar (*Where*). Los autores afirman que su método facilita la formulación de consultas sobre el movimiento de los objetos (e.g., ¿cuál es la distancia de viaje promedio de las personas que usan el transporte público y visitan al menos una atracción cultural?, ¿cuáles son las trayectorias de automóviles que poseen una velocidad media menor a 30 km/h y que se encuentran en una congestión?). La Figura 14 presenta un modelo conceptual enriquecido para una BD. En este, las dimensiones se asocian con las preguntas narrativas que brindan la semántica de la trayectoria (e.g., el tiempo se representa con la pregunta *When* y el espacio con la pregunta *Where*) y son delimitadas con polígonos punteados para facilitar su identificación; además cada nivel se representa con un punto. Moreno et al. [11] enriquecen un modelo conceptual multidimensional espacial, con elementos temporales, convirtiéndolo en un modelo conceptual espacio-temporal. Los autores extienden la notación de [6] mediante las restricciones topológicas de la Figura 15.

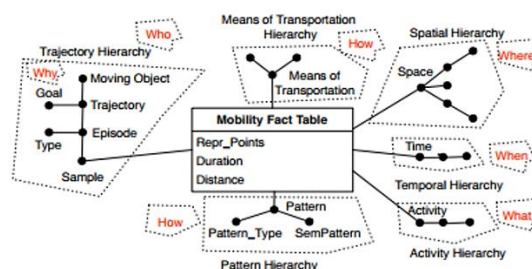
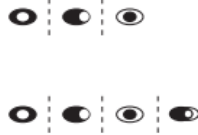
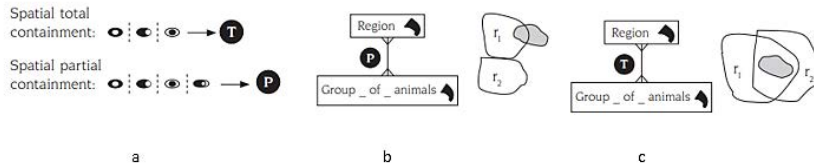


Figura 14. Modelo conceptual para una BD de trayectorias con 5W1H [5]

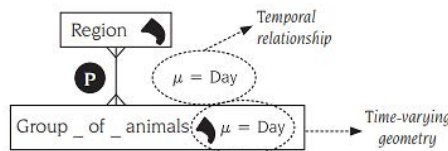


**Figura 15.** Disyunción exclusiva en relaciones espaciales [11]

Las líneas verticales punteadas representan una disyunción exclusiva de las relaciones espaciales. Adicionalmente, se proponen símbolos para representar el *tipo* de inclusión entre los niveles espaciales, i.e., inclusión *total* o *parcial* [18,11] como se muestra en la Figura 16. También se incorporan iconos para representar aspectos temporales como se muestra en la Figura 17.



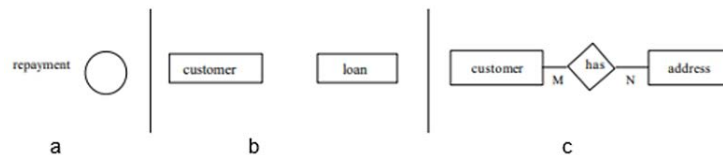
**Figura 16.** Tipos de inclusión y disyunción: a) inclusión total y parcial, b) inclusión parcial y c) inclusión total [11]



**Figura 17.** Relación temporal y geometría variable en el tiempo [11]

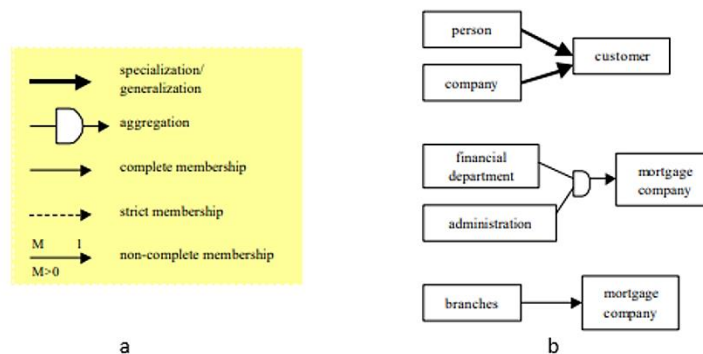
Así, e.g., el polígono en Group\_of\_animals indica que es un nivel espacial (el polígono representa el área cubierta por un grupo de animales) y  $\mu = \text{Day}$  (ubicado al lado del polígono) indica que el área cubierta varía y que dicha variación se puede registrar diariamente. El círculo con la P entre los niveles indica que existe una inclusión parcial entre el área cubierta por un grupo de animales y la región (Region), i.e., el polígono del grupo de animales puede intersectar el polígono de la región.  $\mu = \text{Day}$  (ubicado en la relación) indica que el grado (porcentaje) de inclusión varía y que dicha variación se puede registrar diariamente.

En Tryfona et al. [20] se combina el esquema en estrella con elementos del modelo ER (Entidad-Relación) [21]. Los hechos se representan con círculos, los niveles con rectángulos, las relaciones entre niveles y hechos o entre niveles con rombos y poseen cardinalidad así: muchos a muchos (N:M), muchos a uno (M:1) o uno a muchos (1:M), véase la Figura 18.



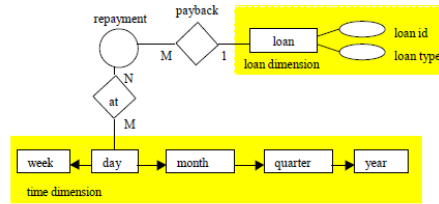
**Figura 18.** Representación de elementos de una BD con elementos del modelo ER: a) hecho, b) niveles-entidades y c) Relaciones entre entidades [20]

Las relaciones entre las entidades pueden ser de tipo especialización/generalización, agregación (i.e., objetos como partes de un objeto, e.g., una compañía se divide en departamentos) y miembro (i.e., un objeto es miembro de otro y tiene las mismas características y comportamiento de este, e.g., las sucursales (branches) de una compañía son miembros de la compañía). En la Figura 19 se presentan ejemplos de estas relaciones y su representación gráfica.



**Figura 19.** Relaciones entre entidades: (a) representación y (b) ejemplos [20]

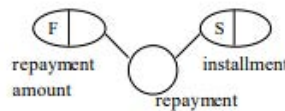
La Figura 20 muestra un fragmento del modelo propuesto por los autores, construido a partir de una empresa de hipotecas (*mortgages*).



**Figura 20.** Hechos, dimensiones y jerarquías StarER [20]

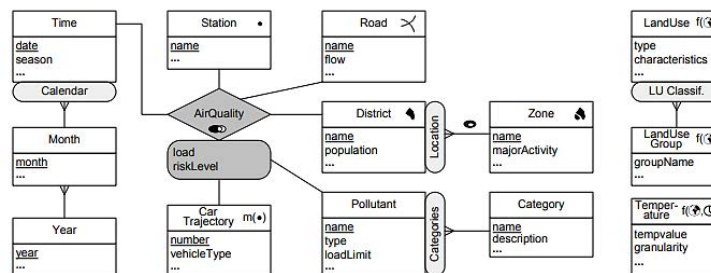
Como se observa en la Figura 20 las entidades y los hechos poseen atributos, estos se representan con óvalos. Los atributos de los hechos suelen ser valores numéricos y se clasifican en tres tipos (Un ejemplo se muestra en la Figura 21):

- Medida (S): valores cuya agregación (suma, promedio) tiene sentido para el negocio (e.g., cantidad vendida).
- Flujo (F): valores cuya agregación (suma, promedio) tiene sentido para el negocio y se aplican sobre periodos registrando el cambio en el tiempo (e.g., monto de reembolso).
- Valor por unidad (V): valores cuya agregación (suma, promedio) no tiene sentido para el negocio (e.g., tasas de interés).



**Figura 21.** Tipos de atributos de hechos y representación gráfica [20]

En Zimányi [22] se presenta un caso de estudio para el análisis de variables meteorológicas (e.g., temperatura, calidad del aire) mediante una BD espacio-temporal. Se extiende la notación presentada en [23]. La Figura 22 muestra el modelo propuesto por los autores el cual consta de un hecho llamada AirQuality y ocho dimensiones (dos de ellas no relacionadas con el hecho).



**Figura 22.** Modelo Espacio - temporal [22]

En este modelo se considera el concepto de *moving region* (región en movimiento), i.e., se considera el movimiento de objetos en crecimiento (e.g., huracanes incendios forestales; confrontar con la propuesta de [11]). También se consideran funciones de tipos de movimientos denotadas  $m(\cdot)$  las cuales representan puntos o áreas en movimiento (i.e., objetos móviles). Además, se incluyen funciones para representar fenómenos que varían con el tiempo o en el espacio (e.g., la temperatura) y se representan mediante  $f(\cdot)$ , donde en los paréntesis se puede incluir un globo terráqueo (variación espacial) o un reloj (variación temporal).

#### 4. COMPARACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MODELOS PARA BD

En la Tabla 1 se comparan los trabajos presentados en este capítulo.

#### 5. CONCLUSIONES Y ÁREA DE ESTUDIO POR EXPLORAR

En este capítulo se presentaron y compararon distintos modelos conceptuales para BD que han sido enriquecidos con iconos. La revisión sugiere que no existen, e.g., modelos conceptuales para BD que consideren el manejo de matrices en las dimensiones o en los hechos. Para ello es necesario definir iconos que permitan representar este tipo de elementos y las operaciones (suma, multiplicación de matrices) y restricciones válidas entre ellas (e.g, matrices invertibles). Esto puede ser útil para dominios como la meteorología [25], específicamente para representar los datos generados por radares meteorológicos para la descripción de las condiciones meteorológicas de una región: estos instrumentos crean una matriz sobre una zona, calculando para cada punto (latitud, longitud) valores de concentración de hidrometeoros [24]. Al darles a estas mediciones un tratamiento matricial, se podrían obtener indicadores más fáciles de interpretar por parte del usuario final (e.g., promedio de los datos de una matriz).

Aunque en los últimos años se han enriquecido diversos modelos conceptuales para BD hay dominios como el químico, el petrolero, el financiero, el textil, entre otros, que carecen de modelos enriquecidos. Cada uno de estos dominios conlleva particularidades que deben ser consideradas para lograr modelos más precisos.

**Tabla 1.** Comparación y clasificación de modelos para BD

Ref.	Dominio	Iconos en los hechos	Iconos en las dimensiones	Iconos en las relaciones	Dominio
[6]	Geo informática, manejo de trayectorias	√	√	√	Manejo de conceptos geométricos y de relaciones topológicas
[15]	Espacio-temporal, análisis de tráfico	√	√	√	Representación gráfica y gestión de objetos espacio temporales
[10]	Logística médica, análisis de trayectorias	√	√		Clasificación de tipos de dimensiones mediante estereotipos
[9]	Logística médica, análisis de trayectorias	√	√		Clasificación de tipos de dimensiones y de objetos espacio temporales, semántica en relaciones topológicas
[4]	Bioinformática	√		√	Versionamiento de dimensiones
[5]	Análisis de trayectorias		√	√	Uso de métodos narrativos para el manejo y análisis de trayectorias
[11]	Espacio-temporal, análisis de trayectorias	√	√	√	Enriquecimiento de relaciones topológicas
[20]	Sector financiero e inmobiliario	√	√		Adecuación del modelo Entidad-Relación para BD
[22]	Análisis de trayectorias, meteorología	√	√	√	Planteamiento de funciones para el análisis de trayectorias de objetos o de áreas de gran tamaño

## REFERENCIAS

- [1] Gosain, A. & Singh, J. (2015). Conceptual Multidimensional Modeling for Data Warehouses: A Survey. In 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications.
- [2] Inmon, W. (1996). Building the data warehouse. Wiley.
- [3] Kimball, R. & Ross, M. (1996). The data warehouse Toolkit. Wiley.
- [4] Arigon, A., Tchounikine, A. & Miquel, M. (2006). Handling multiple points of view in a multimedia data warehouse. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications* 2(3), 199-218.
- [5] Wagner, R. et al. (2014). Mob-Warehouse: A Semantic Approach For Mobility Analysis With a Trajectory Data Warehouse. In International Conference on Conceptual Modeling.
- [6] Malinowski, E. & Zimányi, E. (2004). Representing spatiality in a conceptual multidimensional model. In 12th Annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems.
- [7] Malinowski, E. & Zimányi, E. (2007). Implementing spatial data warehouse hierarchies in object-relational DBMSs. *ICEIS*.
- [8] Orlando, S. et al. (2007). Trajectory Data Warehouses: Design and Implementation Issues. *Journal of Computing Science and Engineering* 1(2), pp. 211-232.
- [9] Jenhani, F. & Akaichi, J. (2014). Semantic View on Trajectory Data for Ambulance Services Enhancement: Modeling, Storage, and Analysis Issues. In 6th International Workshop on Business Intelligence for the Real Time Enterprise.
- [10] Oueslati, W. & Akaichi, J. (2014). Trajectory data warehouse modeling based on a Trajectory UML profile: Medical example. In International Work-Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.
- [11] Moreno, F., Echeverri, J. & Arango, F. (2010). Reclassification queries in a geographical data warehouse. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* 33(3), 263-271.
- [12] Reinos, E. (2012). Bases de datos. Alfaomega.
- [13] Silvers, F. (2008). Building and maintaining a data warehouse. CRC Press.
- [14] Parent, C., Spaccapietra, S. & Zimányi, E. (1999). Spatio-temporal conceptual models. In Seventh ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems.
- [15] Campora, S., de Macedo, J. & Spinsanti, L. (2011). St-toolkit: A framework for trajectory data warehousing. In 14th AGILE Conference on Geographic Information Science.
- [16] Yan, Z. et al. (2010). A Hybrid Model and Computing Platform for Spatio-semantic Trajectories. In *Extend Semantic Web Conference*.
- [17] Spaccapietra, S. et al. (2008). A conceptual view on trajectories. *Data & Knowledge Engineering* 65(1), 126-146.
- [18] Jensen, C. et al. (2002). Multidimensional data modeling for location-based services. In 10th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems.
- [19] Malinowski, E. & Zimányi, E. (2005). Spatial hierarchies and topological relationships in the spatial MultiDimER model. In 22nd British National conference on Databases: enterprise, Skills and Innovation.
- [20] Tryfona, N., Busborg, F. & Christiansen, J. (1999). starER: A Conceptual Model for Data Warehouse Design. In 2nd ACM international workshop on Data warehousing.
- [21] Chen, P. (1976). The Entity-Relationship Model: Toward a unified view of Data. *ACM TODS* 1(1), 9-36.
- [22] Zimányi, E. (2012). Spatio-temporal data warehouses and mobility data: Current status and research issues. In 19th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning.
- [23] Malinowski, E. & Zimányi, E. (2008). *Advanced Data Warehouse Design*. Springer.
- [24] Ciach, G. & Krajewski, W. (1999). Radar-Rain Gauge Comparisons under Observational Uncertainties. *Journal of Applied Meteorology* 38(10), 1519-1525.
- [25] Jones, P. & Thornton, P. (1997). Spatial and temporal variability of rainfall related to a third-order Markov model. *Agricultural and Forest Meteorology* 86(1-2), 127-138.



En la actualidad se observa una creciente tendencia y predominancia de los protocolos de comunicaciones asociados a la internet. El estar conectados todo el tiempo desde diversos dispositivos se ha convertido en algo habitual, sin embargo, los riesgos asociados a esta creciente conectividad también aumentan y al parecer dichos riesgos son ignorados por la ciudadanía en general. Las redes Wifi abiertas hacen parte de esa realidad, convirtiéndose en un mecanismo que nos permite y facilita el integrarnos a esta nueva modalidad de vida, estar siempre conectados. Desafortunadamente la concientización en temas de seguridad informática no crece a la par de nuestra tendencia en conectividad. Se identifica que las redes Wifi abiertas son un verdadero peligro para la seguridad de la información de los usuarios que se conectan a las mismas, quienes en su afán de permanecer conectados de manera gratuita podrían estar pagando dicha conectividad sin saberlo con su información personal, siendo que 69 *access point* pertenecientes a redes abiertas reportaron en 11 minutos tener conectados a 6407 clientes. Así mismo se logra establecer que las zonas Wifi abiertas son lugares de concentración de gran variedad de dispositivos logrando identificar en 11 minutos a 9139 terminales diferentes, por lo cual podrían llegar a ser atractivas para los ciberdelincuentes al concentrar en un espacio fácilmente accesible gran cantidad de potenciales víctimas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de acceso inalámbrico que operan bajo la familia del estándar 802.11 conocidas como redes Wifi, han alcanzado cifras considerables en Colombia en nuestros días. Su principal uso es servir de enlace a internet para dispositivos móviles como smartphones y tablets en lugares públicos, viviendas, pequeñas y grandes empresas. Sin embargo también sirve de pasarela para computadores en redes domésticas y corporativas [1]. En la actualidad los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones[2]–[4] en Colombia instalan routers inalámbricos dentro de sus planes de acceso a internet y según las cifras publicadas en el boletín trimestral de las TIC del cuarto trimestre del 2017[5] en Colombia existen un poco más de seis millones de conexiones a internet en líneas fijas, por otra parte el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones[6] al 22 de mayo de 2018 presenta en funcionamiento 1426 zonas Wifi públicas distribuidas a través de la geografía nacional, eso sin contar las zonas Wifi implementadas en distintos centros comerciales, nos muestra parte del auge que las mismas han tenido en el país.

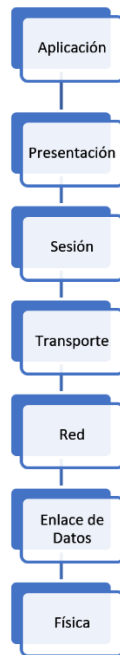
No obstante su amplia aceptación y despliegue, es necesario identificar que existen múltiples vulnerabilidades de seguridad descubiertas sobre la familia de protocolos 802.11 sobre la cual operan las redes Wifi, que suponen un riesgo para la disponibilidad, la confidencialidad y la integridad de la información que se envía a través de dichas redes, razones por las cuales se han establecido mecanismos de cifrado para los datos transmitidos a través de las redes Wifi, siendo el más seguro en nuestros días el Wifi Protected Access (WPA2)[7]. Sin embargo, en las redes abiertas las tramas de datos, encargadas de transportar la información, se transmiten en texto plano, ¿Con que frecuencia se usan las redes abiertas? ¿Cuántos dispositivos se conectan a las mismas? ¿Cuáles son los riesgos que conlleva el uso de redes abiertas? El objetivo de la presente investigación está enfocado en demostrar el uso de redes abiertas en lugares públicos de Bogotá, así como identificar riesgos asociados a su implementación y establecer cifras respecto a la cantidad de terminales que acceden a las mismas.

## 2. EL PAPEL DEL ESTÁNDAR DE COMUNICACIONES 802.11 DENTRO DEL MODELO OSI

El modelo de comunicaciones OSI (Open Systems Interconnection) es un modelo de capas establecido con el propósito de diseñar, ejecutar y mantener protocolos de comunicaciones de datos. el cual se convirtió en el arquetipo de las redes informáticas[8]. Cada una de las capas de modelo se comunica únicamente con la capa inmediatamente superior o inferior, tal y como se observa en la Figura 1. El protocolo de comunicaciones 802.11 trabaja directamente sobre las capas 2(enlace de datos) y 1 (física). Donde la capa 1 se ocupa de la transmisión de información en forma de bits sobre el aire (ondas electromagnéticas) y la capa 2 se encarga del flujo de bits enviados por la capa física que son organizados en grupos lógicos llamados tramas, es así como a la unidad de dato de protocolo en la capa 2 es conocida como “trama”[9]. Las tramas normalmente constan de cabecera, datos y cola[10]. Cada trama contiene distintos campos de control, así como información de referencia como las direcciones MAC de origen y destino y el muy estimado campo de datos procedente de la capa 3 (capa de red o IP) entre otros. La dirección MAC es un identificador de 48 bits (de 8 bloques hexadecimales) que corresponde de forma única a la tarjeta de red, es decir que cada dispositivo tiene su propia dirección MAC determinada y configurada, donde los primeros 24 bits identifican al fabricante de la tarjeta [11]. Las direcciones MAC son únicas a nivel mundial sin embargo debido a que desde el sistema operativo se distribuye dicha MAC a través de la red, la misma es susceptible de ser modificada o falsificada.

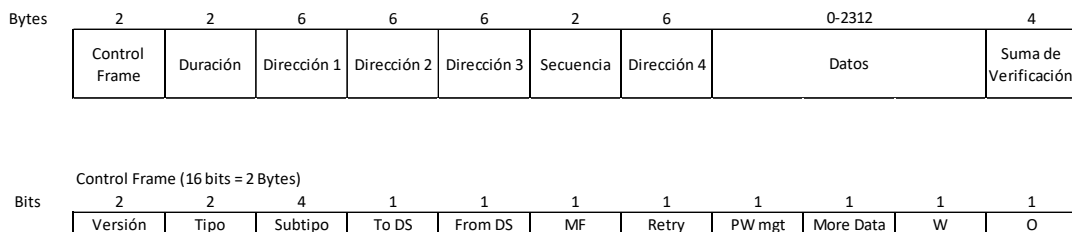
---

<sup>1</sup> francisco.valle@uniagustiniana.edu.co



**Figura 1.** Modelo OSI

Cabe resaltar que en una red inalámbrica tipo Wifi configurada en modo de infraestructura, la comunicación en la capa 2 siempre se da entre el Access point y el terminal conectado. (el cual puede ser un computador, una tableta, un teléfono inteligente, etc.) El protocolo 802.11 define que las tramas de gestión y control de red, las cuales gestionan el tráfico y las propiedades de la comunicación entre el punto de acceso y los clientes sean enviadas en texto claro; es decir que las mismas nunca van cifradas y pueden ser leídas e interpretadas por cualquier dispositivo que pasivamente se encuentre escuchando la red dentro de su área de cobertura [9]. Sin embargo, es necesario recordar que en las redes abiertas, por no utilizar ningún protocolo de cifrado los datos provenientes de la capa 3 también son enviados en texto plano, es decir que los mismos se transmitirían en texto claro a menos que hubiesen sido cifrados por una capa superior. En la figura 2 podemos observar la estructura de la trama de datos.



**Figura 2.** Estructura de la trama de datos

Los campos asociados a la dirección pueden variar según sea el origen y el destino de las tramas conforme los valores presentados en el campo de control de trama (Control Frame), tal y como se indica a continuación (Tabla 1):

- Si [To DS = 0] y [From DS = 0]: se envían datos de una terminal a otra terminal
- Si [To DS = 0] y [From DS = 1]: se envían datos del Access Point a una terminal
- Si [To DS = 1] y [From DS = 0]: se envían datos de una terminal al Access Point
- Si [To DS = 1] y [From DS = 1]: se envían datos de una Access Point a otro Access Point

**Tabla 1.** Valores del Control Frame

To DS	From DS	Dirección MAC 1	Dirección MAC 2	Dirección MAC 3	Dirección MAC 4
0	0	Destino	Origen	BSSID	N/A
0	1	Destino	AP Emisor	Origen	N/A
1	0	AP Receptor	Origen	Destino	N/A
1	1	AP Receptor	AP Emisor	Destino	Origen

El campo de control que indica si la trama se encuentra cifrada es el marcado como W. Las tramas se clasifican según la función que desempeñen en tramas de control, las cuales se encargan de controlar el acceso al medio, tramas de gestión las cuales permiten mantener la comunicación y las tramas de datos las cuales transportan la información procedente de las capas superiores. Dentro de las tramas de gestión es necesario señalar el papel que cumplen las tramas tipo "beacon" ya que mediante estas el access point difunde su presencia e informa las características de la red. Es así como las terminales que se encuentren interesadas en identificar las redes disponibles en determinada área se enfocan en buscar las tramas tipo beacon. Otra manera de identificar a los access point disponibles es mediante

la emisión de tramas tipo “probe request” enviadas en modo broadcast esperando que dicha solicitud sea contestada por todos los puntos de acceso capaces de escucharla, al capturar tramas tipo probe request que provengan de otros dispositivos enviados a un access point en particular es posible determinar el listado de puntos de acceso a los cuales se ha conectado dicho terminal, información útil al momento de realizar un ataque.

## 2.1 Crecimiento del cibercrimen y ataques asociados a redes Wifi

El ciber espionaje, las preocupaciones en materia de privacidad y la proliferación de nuevas vulnerabilidades, han sido en parte responsable de los altos costos asociados a los delitos cibernéticos. Solo en el año 2013 según cifras reveladas por la OEA [12] se estima que ascendieron a por lo menos USD 113.000 millones. En Brasil los costos asociados a los delitos cibernéticos alcanzaron los USD 8.000 millones, seguidos por México con USD 3.000 millones y Colombia con USD 464 millones.

A nivel mundial, cada una de ocho violaciones de datos dieron como resultado la exposición de 10 millones de identidades; además, la cantidad de ataques dirigidos se incrementó. Al mismo tiempo, la actitud despreocupada de los jóvenes en cuanto al uso de las redes sociales, junto con la abundante disponibilidad de dispositivos móviles condujo al aumento de las estafas y generó mayores oportunidades para los ciberdelincuentes, en un momento en que el uso de las redes sociales en dispositivos móviles desempeña un papel de importancia cada vez mayor en la vida cotidiana. Los dispositivos móviles se están transformando rápidamente en el método preferido de acceso a Internet, especialmente para usar las redes sociales. Casi el 95% de los usuarios de Internet en Centro y Sur América [12]. Utilizan sitios de redes sociales de forma activa. El aumento en el uso de Internet y de los ataques cibernéticos relacionados enfatiza la necesidad de desarrollar estudios y análisis que nos lleven identificar políticas y defensas eficaces en materia cibernética.

Las redes inalámbricas transportan información a través del espectro radio eléctrico, y trasladan la información en forma de onda electromagnética y es precisamente por este medio que la información puede ser interceptada y muchas veces descifrada, permitiendo a un tercero el acceso a la red inalámbrica [13, 14]. Acarreando problemas de robo de información sensible, como credenciales, información financiera, de historias clínicas o personal, entre otras. A la fecha estas deficiencias se han trabajado y se ha podido disminuir notablemente la probabilidad de explotación a través de una correcta implementación de tecnologías como servicios de Autenticación, conexiones VPN, Servicio de Identidad y Accesos (IAM), NPS, los cuales más que una instalación de herramientas involucran un modelamiento de los servicios a implementar [13, 15].

El uso creciente de redes Wifi en lugares de acceso público ha motivado diversos estudios en torno al desempeño de dichas redes, [16],[17] así como posibles desarrollos para mejorar dicho protocolo de comunicaciones. (Wifi Dúplex) [18] y obtener un mejor aprovechamiento del espectro utilizado cuando se trabaja en áreas con alto tráfico inalámbrico [19].

El alto despliegue y aceptación que ha tenido la tecnología Wifi se traduce en un aumento de la superficie de ataque y de desafíos para las organizaciones, el personal de TI y los profesionales de seguridad de TI. Así mismo se observa un aumento en los ataques hacia redes Wifi, [20] entre los cuales tenemos ataques a la confidencialidad, en el cual los intrusos intentan interceptar la información que se ha enviado a través de la red inalámbrica como ejemplos tenemos el ataque de hombre en el medio, Evil Twin AP, y AP Phishing, etc.; Ataques de control de acceso en este tipo se intenta penetrar en una red eludiendo los filtros y el cortafuegos de la red para obtener acceso no autorizado; Ataques a la integridad a través del cual se busca alterar los datos mientras está en transmisión. En este tipo de ataque, el intruso intenta alterar, eliminar o agregar marcos de administración o datos, es decir, control falsificado a la red, lo que puede engañar al destinatario o facilitar otro tipo de ataque; Ataques a la disponibilidad con el cual se impide a los clientes legítimos el acceso a la red. El ataque de denegación de servicio es el tipo más común de ataque de disponibilidad que se centra en atacar una parte específica de la red para que la red sea inalcanzable.

La privacidad prometida por WEP en las primeras ediciones del estándar IEEE 802.11 bajo el cual operan las redes Wifi, fue tomada como un referente de seguridad, pero debido a sus fallas las redes Wifi se catalogaron como inseguras. En ediciones más recientes de este estándar y con el Acceso Protegido a Wifi (WPA) del Wifi-Alliance, se ha restaurado un poco la confianza[21], algunos de los más conocidos son: ataques de negación de servicio, de secuestro de sesión, tipo hombre en el medio, de falsificación, entre otros [22]. En un ataque tipo hombre-en-el-medio se lleva a los usuarios a iniciar sesión en una computadora que está configurada como un AP (punto de acceso). Una vez hecho esto, el atacante se conecta a un acceso real que ofrece un flujo constante de tráfico a través de la red. De esta manera el atacante puede husmear el tráfico de red del usuario afectado, mientras este piensa que se encuentra conectado a un AP legítimo [23].

Un ataque de denegación de servicio (DoS) ocurre cuando un atacante bombardea continuamente un AP designado o red con solicitudes falsas. Estos causan que los usuarios legítimos no pueden conectarse a la red e incluso pueden hacer que la red falle. Estos ataques se basan en el abuso de protocolos como la autenticación extensible. Protocolo (EAP) [23]. En un ataque de inyección de red, un atacante puede hacer uso de APs que están expuestos a tráfico de red no filtrado. El intruso inyecta falsos comandos de reconfiguración de red que afectan a los enrutadores, conmutadores y hubs inteligentes con lo cual toda una red puede quedar des configurada y requerir para su funcionamiento del reinicio de los equipos o incluso la reprogramación de todos los dispositivos de la red [23].

### 3. MÉTODO DE ANÁLISIS DE REDES ABIERTAS

En la actualidad la tecnología inalámbrica más utilizada para crear redes de área local, es la que sigue la norma IEEE 802.11 mejor conocida como Wifi[24]. En la Tabla 2 se presentan las características de diferentes versiones de dicha norma.

Tabla 2. Versiones de la Norma IEEE 802.11

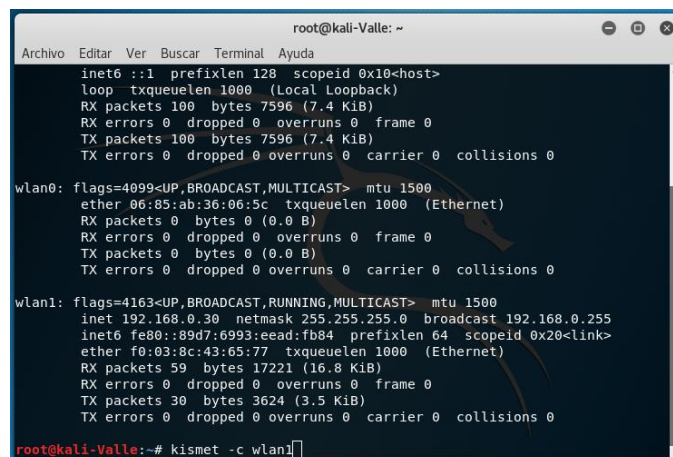
Versión	Características
802.11 a	54 Mbps teóricos en la banda de 5 GHz
802.11 b	11 Mbps teóricos en la banda de 2,4 GHz
802.11 e	Incorpora a esta tecnología la calidad del servicio QoS
802.11 g	54 Mbps teóricos en la banda de 2,4 GHz
802.11 i	Incorpora autenticación y cifrado AES
802.11 n	600 Mbps teóricos con el uso de las bandas 2,4 y 5 GHz
802.11 ac	1 Gbps teóricos en la banda de 5 GHz
802.11 ad	8 Gbps teóricos en las bandas de 2,4 y 5 GHz

Para analizar redes inalámbricas abiertas en la ciudad de Bogotá que operan bajo la norma IEEE 802.11, se deben utilizar una serie de equipos (hardware y software) compatibles con la misma; aquí se utilizaron los siguientes:

1. Tarjeta AWUS036NHR del fabricante ALFA NETWORK que opera en la frecuencia de los 2,4GHz compatible con las normas 802.11 b/g/n.
2. Router Nebula 300 compatible con las normas 802.11 b/g/n.
3. Computador portátil Asus X456U.
4. Celular Huawei Mate 10 – como dispositivo víctima de prueba.
5. Sistema operativo Kali Linux en su versión 2018.2, el cual es un proyecto de código abierto mantenido y financiado por Offensive Security.
6. Kismet - Un sniffer para redes inalámbricas.
7. Wireshark – Un analizador del protocolo de red.
8. Suite de Aircrack-NG

#### 3.1 Redes abiertas identificadas

Se analizaron 6 sitios en los cuales operan redes inalámbricas abiertas, sobre los cuales se recogieron datos estadísticos de la cantidad de usuarios reportados en dichas zonas. Así mismo fue necesaria la implementación de una red de prueba sobre la cual lanzar el ataque y demostrar que el mismo puede ser replicado en cualquiera de las redes abiertas reales. Para efectuar la captura de los paquetes transmitidos entre el access point y los dispositivos cliente, desde el computador portátil Asus con sistema operativo Kali Linux, se configura en el sniffer Kismet la captura de datos utilizando la tarjeta de red AWUS036NHR. Identificada en la Figura 3 como “wlan1”.



```
root@kali-Valle: ~  
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda  
inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10<host>  
loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)  
RX packets 100 bytes 7596 (7.4 KiB)  
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0  
TX packets 100 bytes 7596 (7.4 KiB)  
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0  
  
wlan0: flags=4099<UP,BROADCAST,MULTICAST> mtu 1500  
ether 06:85:ab:36:06:5c txqueuelen 1000 (Ethernet)  
RX packets 0 bytes 0 (0.0 B)  
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0  
TX packets 0 bytes 0 (0.0 B)  
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0  
  
wlan1: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500  
inet 192.168.0.30 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.0.255  
inet6 fe80::89d7:6993:eead:fb84 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>  
ether f0:03:8c:43:65:77 txqueuelen 1000 (Ethernet)  
RX packets 59 bytes 17221 (16.8 KiB)  
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0  
TX packets 30 bytes 3624 (3.5 KiB)  
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0  
  
root@kali-Valle:~# kismet -c wlan1
```

Figura 3. Configuración kismet

En la Figura 4 se puede observar parte del funcionamiento del kismet cuando se encuentra capturando los datos que se encuentran dentro del alcance de la tarjeta inalámbrica AWUS036NHR. En el primer sitio se capturo tráfico durante 15 minutos y se identificaron 1858 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 124 eran access point (AP), de estos 15 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 4 utilizaban el cifrado de datos WEP, 102 empleaban cifrado WPA, sobre 3 no se obtuvo información del cifrado utilizado. Los AP abiertos reportaron 2609 clientes. Se observó que 1734 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 5 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

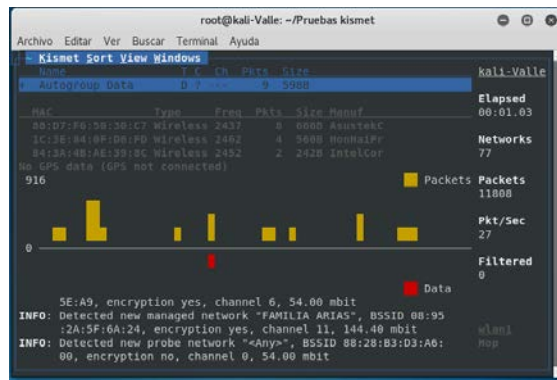


Figura 4. Kismet

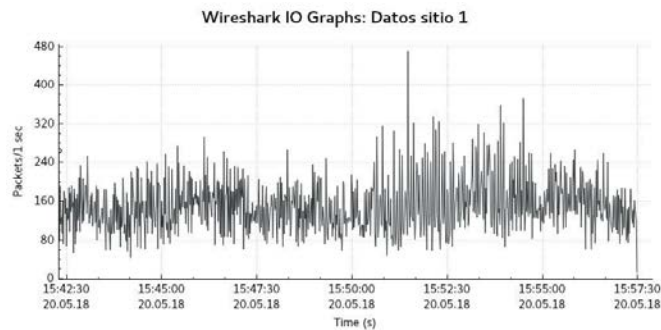


Figura 5. Tráfico de datos sitio 1

En el segundo sitio se capturo tráfico durante 16 minutos y cuarenta segundos, se identificaron 2449 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 118 eran access point (AP), de estos 18 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 3 utilizaban el cifrado de datos WEP, 94 aplicaba el cifrado WPA, sobre 3 no se obtuvo información del cifrado utilizado. Los AP abiertos reportaron 2636 clientes. Se observó que 2331 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 6 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

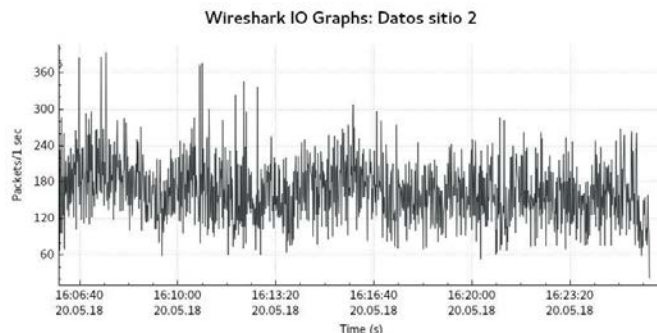


Figura 6. Tráfico de datos sitio 2

En el tercer sitio se capturo tráfico durante 5 minutos y se identificaron 1281 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 89 eran access point (AP), de estos 14 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 72 utilizaban cifrado WPA y sobre 3 no se obtuvo información del cifrado empleado. Los AP abiertos reportaron 1063 clientes. Se observa que 1192 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 7 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

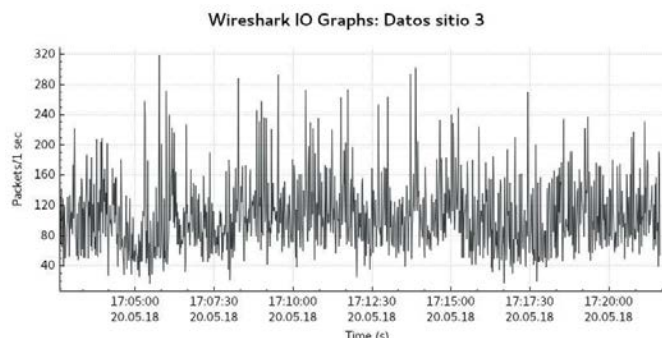


Figura 7. Tráfico de datos sitio 3

En el cuarto sitio se capturo tráfico durante 8 minutos y 20 segundos, se identificaron 1900 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 111 eran access point (AP), de estos 14 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 1 utilizaba el cifrado de datos WEP, 93 aplicaban el cifrado WPA, sobre 3 no se obtuvo información del cifrado manejado. Los AP abiertos reportaron 44 clientes. Se observa que 1784 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 8 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

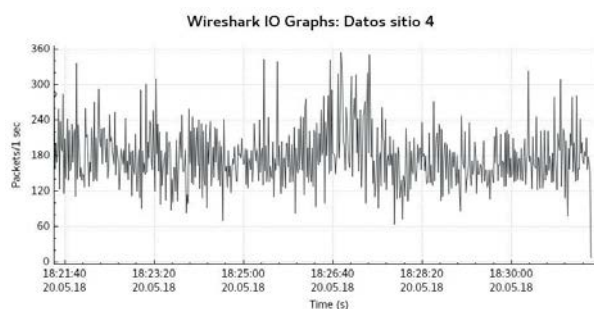


Figura 8. Tráfico de datos sitio 4

En el quinto sitio se capturo tráfico durante 8 minutos y veinte segundos, se identificaron 1028 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 98 eran access point (AP), de estos 8 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 86 utilizaban cifrado WPA, sobre 4 no se obtuvo información del cifrado manejado. Los AP abiertos reportaron 55 clientes. Se observó que 930 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 9 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

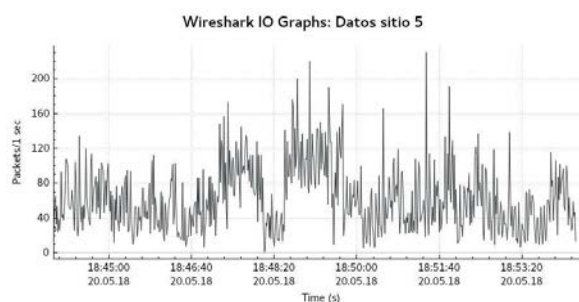


Figura 9. Tráfico de datos sitio 5

En el sexto sitio se capturo tráfico durante doce minutos y treinta segundos, se identificaron 1259 dispositivos con direcciones MAC diferentes, de los cuales 96 eran access point, de estos 6 no tenían ningún tipo de protocolo de cifrado, 3 usaban el cifrado WEP y 87 aplicaban cifrado WPA. Los AP abiertos reportaron 27 clientes. Se observó que 1163 de los equipos identificados eran clientes o dispositivos que tenían su configuración Wifi activa dentro del área de cobertura de la red. En la Figura 10 se puede observar el comportamiento del tráfico de datos capturado.

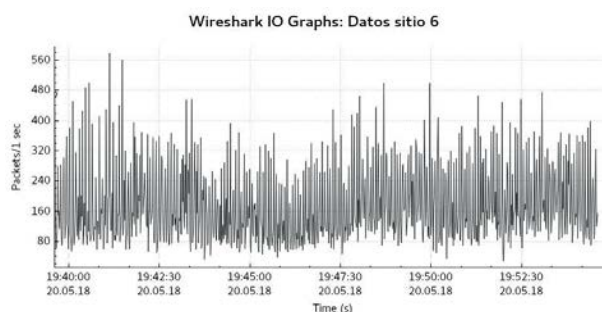


Figura 10. Tráfico de datos sitio 6

Respecto del séptimo sitio revisado, el cual obedecía a una red de prueba instalada no se presenta datos de los dispositivos conectados ni gráfico con el tráfico del mismo ya que no obedece a situaciones reales. En su lugar representa una red de controlada y el tráfico de la misma obedece al acceso a una cuenta WEB creada con el único propósito de ser atacada y probar que es posible realizar el robo de los datos del usuario de dicha red, el ataque efectuado y descrito a continuación se realiza con la intención de capturar las cookies de sesión, a través de las cuales se puede obtener el acceso a la cuenta del usuario sin conocer la contraseña utilizada por el mismo.

### 3.2 Ataque realizado a la red de prueba

Sobre la red de prueba instalada se realizó un ataque tipo "hombre en el medio" capturando todo el tráfico cursado ente el access point y un dispositivo cliente (smartphone Huawei Mate 9), en el dispositivo cliente se visita la web

[www.portafolio.co](http://www.portafolio.co) y se accede a la cuenta creada en la misma. Desde el dispositivo atacante (portátil Asus) se captura todo el tráfico utilizando la suite Aircrack, configurada para capturar todo el flujo de datos entre el access point y el dispositivo cliente. Al analizar el tráfico capturado se logran claramente identificar la cookie de sesión utilizada, con la cual se puede acceder a la cuenta del usuario de prueba que utilizo la red inalámbrica abierta, tal y como se observa en la Figura 11. Evidenciando de esta manera el riesgo asociado al uso de redes inalámbricas abiertas.

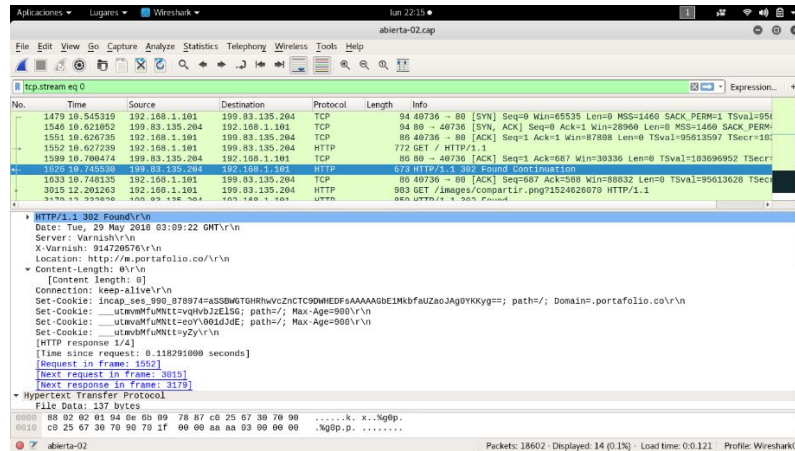


Figura 11. Captura de cookie de sesión

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que, a pesar de existir vulnerabilidades demostradas asociadas al uso de redes inalámbricas abiertas, las mismas son actualmente utilizadas por un gran número de usuarios en Colombia. Se pudo observar que 69 access point pertenecientes a redes abiertas reportaron 6407 dispositivos clientes en un tiempo promedio de 11 minutos, comprometiendo de esta manera los usuarios de dichas redes la seguridad de su información. Estos números dan a entender la necesidad de generar conciencia en temas de ciberseguridad tanto en las entidades que configuran redes públicas sin protocolos de seguridad, como en los usuarios de dichas redes, es decir la ciudadanía en general.

Se observa también la alta concentración de dispositivos que se presenta en los espacios asociados a redes Wifi abiertas, se encontraron en total 9139 equipos activos en cercanías a dichas redes en un tiempo promedio de 11 minutos. Este número podría llamar la atención de ciberdelincuentes que podrían lanzar ciberataques en sitios donde se identifiquen redes wifi abiertas debido a la alta concentración de potenciales víctimas en un espacio reducido y fácilmente accesible.

Se identificaron 567 access point pertenecientes otras redes, en la zona de influencia de las redes Wifi abiertas. Los cuales a pesar de tener configurado algún protocolo de cifrado de datos, por su cercanía a dichas redes podrían llegar a ser objeto de ciberataques, esto dado la facilidad que tendría el ciberdelincuente para acceder al área de cobertura de las mismas pretendiendo simular ser usuario de la zona Wifi abierta.

## REFERENCIAS

- [1] Fernandez, Y. (2017). Python Scapy Dot11. Createspace Independent Pub.
- [2] Movistar. (2018). [Internet banda ancha](#). Planes hogar. Online [May 2018].
- [3] Claro (2018). [Disfruta del internet con mayor velocidad](#). Claro Colombia. Online [May 2018].
- [4] Tigo (2018). [Internet | Tigo Colombia](#). Online [May 2018].
- [5] MINTIC (2018). [Cifras Cuarto Trimestre de 2017](#). Online, accessed May 2018.
- [6] MINTIC (2018). [Inicio - Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones](#). Online [May 2018].
- [7] WIFI Alliance (2012). [The State of Wi-Fi® Security: Wi-Fi CERTIFIED™ WPA2™ Delivers Advanced Security to Homes, Enterprises and Mobile Devices](#). Online [May 2018].
- [8] Black, U. (2010). Manual Imprescindible de REDES. Anaya Multimedia.
- [9] IEEE (2016). Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society. IEEE Xplore.
- [10] Teran, D. (2010). Redes Convergentes Diseño e implementación. Alfaomega.
- [11] Sory, K & Baluja, W. (2011). Detección de intrusos en la capa de enlace del protocolo 802.11. D - Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- [12] Symantec & OEA (2014). Latin American + Caribbean cyber security trends. Organization of American States.
- [13] De la Cruz, H. (2013). Hacking y cracking. Redes inalámbricas. Macro.
- [14] ANE (2018). Espectro Radioeléctrico. Agencia Nacional del Espectro.
- [15] Madrid, J. (2006). Seguridad en redes inalámbricas 802.11. Sist. y Telemática 3, 13–28.
- [16] Seneviratne, S. et al. (2013). Characterizing WiFi Connection and Its Impact on Mobile Users: Practical Insights. In 8th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation & characterization.
- [17] Al-Bado, M. & Sengul, C. (2013). Measurement-based Simulation of WiFi Interference. In 16th ACM Int. Conf. Model. Anal. & Simul. Wirel. Mob. Syst.
- [18] Liao, Y., Bian, K. & Song, L. (2015). Full-duplex WiFi: Achieving Simultaneous Sensing and Transmission for Future Wireless Networks. In 16th ACM Int. Symp. Mob. Ad Hoc Netw. Comput.
- [19] Karunambiga, K. & Sundarambal, M. (2014). LU-MAC: Licensed and unlicensed MAC protocol for cognitive WiFi network with jamming-resistant. Procedia Comput. Sci. 47(C), 424–433.
- [20] Waliullah, M., Moniruzzaman, A. & Rahman, S. (2015). An Experimental Study Analysis of Security Attacks at IEEE 802.11 Wireless Local Area Network. Int. J. Futur. Gener. Commun. Netw. 8(1), 9–18.
- [21] Gordon, S. (2011). Wifi security cracked. Netw. Secur. 2011(1), 2–20.
- [22] Cebula, S. et al. (2011). How secure is WiFi MAC layer in comparison with IPsec for classified environments? October, 109–116.
- [23] Choi, M. et al. (2008). Wireless Network Security: Vulnerabilities, Threats and Countermeasures. Int. J. Multimed. Ubiquitous Eng. 3(3), 77–86.
- [24] Gómez, J. (2008). Guía de Campo de WIFI. RA-MA.



Gloria Y. Tobón C.<sup>1</sup>

Mónica M. Rojas R.<sup>2</sup>

Adriana X. Reyes G.<sup>3</sup>

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín – Antioquia

El marco ágil está orientado al trabajo en equipo, característica que constituye uno de los puntos claves del éxito de Scrum. En la actualidad existen diversas tecnologías que pueden facilitar la interacción de las personas. Es así como, equipos que se encuentren ubicados geográficamente en diversos lugares, podrían adoptar herramientas que les ayuden en este sentido, como videoconferencia, chats, documentos compartidos, entre otros. Si bien todas estas herramientas ayudan al trabajo colaborativo, diversos investigadores ven la necesidad de disminuir barreras, lograr un mayor acercamiento, buscando estrategias, de modo que las personas se sientan efectivamente trabajando de manera colaborativa en un espacio único, compartido. En este capítulo se presenta una perspectiva actual y futura del trabajo colaborativo, y como podrían beneficiarse proyectos gestionados con Scrum, de este tipo de tecnologías emergentes.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las empresas tienen una misión y visión específica, donde el conjunto de metas u objetivos de cada proceso organizacional debe apuntar al logro específico de las mismas. Es así como el trabajo colaborativo cobra relevancia, en el sentido que, son finalmente un grupo de personas quienes van a desarrollar las actividades, para obtener las metas propuestas.

Existen hoy en día muchas tecnologías para el trabajo colaborativo que facilitan la interacción de los individuos. Poco a poco con los avances en diferentes investigaciones, se van vislumbrando mayores oportunidades para el trabajo colaborativo, las cuales brindan una sensación de cercanía, a pesar de las diferencias geográficas. Muchas de estas nuevas facilidades, utilizan la inteligencia artificial, la realidad virtual, lenguajes de programación avanzados, y no solo esto, sino que además aprovechan conocimientos de otras ciencias para mejorar la experiencia, como la Psicología, la Medicina, entre otras.

El marco ágil Scrum, ha ido cobrando adeptos cada vez más. Las prácticas ágiles, constituyen una ventaja competitiva, que de acuerdo con sus principios y características establecen unas metas que son realizadas por un grupo de personas, Scrum Team, Scrum Master, Product Owner. Al respecto Castillo [1] indica que *“SCRUM es una metodología ágil de desarrollo de software que es iterativa e incremental en la cual un equipo de programadores trabaja como una unidad auto organizada para alcanzar un objetivo común”*. De esta forma, para lograr esa unidad, se deben romper barreras, una manera de hacerlo es por medio de herramientas colaborativas, en ambientes que les permitan tener una mayor interrelación, sobre todo cuando los miembros del equipo se encuentran en sitios remotos.

Scrum como marco ágil, afirma en una de sus premisas, la necesidad de tener: *“Las interacciones y los individuos, por encima de los procesos y las herramientas”* [2]. Este principio en particular tiene una serie de implicaciones, como por ejemplo la necesidad latente de aprovechar instrumentos que faciliten el ambiente colaborativo, en el cual la toma de decisiones, el intercambio de ideas, se desarrolle sin limitaciones geográficas. Mucho más en este Siglo XXI, donde tantas tecnologías emergentes tienen como objetivo coadyuvar en el trabajo en equipo por medio de aplicaciones de gestión desarrolladas para tal fin.

El objetivo de este capítulo es dar a conocer diversas investigaciones en torno al trabajo colaborativo, que se están desarrollando y mejorando actualmente, las cuales pueden constituir una gran ventaja no solo en términos del marco ágil Scrum, sino también en otros ámbitos. Además, se presenta inicialmente la actualidad del trabajo colaborativo, posteriormente se dan a conocer el trabajo colaborativo con Scrum, algunas de las tecnologías emergentes que favorecen el trabajo colaborativo, el resultado de la investigación y finalmente las conclusiones.

## 2. ACTUALIDAD DEL TRABAJO COLABORATIVO

El trabajo colaborativo se define como: *“la unión entre los miembros del grupo para mejorar su capacidad de aprender, tomando en consideración otros puntos de vista, así como distintas maneras de hacer las cosas, interpretaciones diferentes de conceptos y experiencia”* [3]. Esto no significa que todas las actividades se efectúan en grupo, sino, más bien, que la colaboración como tal se realiza en el momento oportuno, con los medios de comunicación y herramientas que faciliten el trabajo.

---

<sup>1</sup> [gytobon@elpoli.edu.co](mailto:gytobon@elpoli.edu.co)

<sup>2</sup> [mmrojas@elpoli.edu.co](mailto:mmrojas@elpoli.edu.co)

<sup>3</sup> [axreyes@elpoli.edu.co](mailto:axreyes@elpoli.edu.co)

Diversos autores resaltan la importancia, y las ventajas de trabajar colaborativamente, es así como López [4], asegura que *“en un grupo colaborativo existe una autoridad compartida y una aceptación por parte de los miembros que lo integran, de la responsabilidad de las acciones y decisiones del grupo. La premisa fundamental del Aprendizaje Colaborativo está basada en el consenso construido a partir de la cooperación de los miembros del grupo y a partir de relaciones de igualdad, en contraste con la competencia en donde algunos individuos son considerados como mejores que otros miembros del grupo”*. En este sentido, no hay una persona o personas que promuevan el mando sobre los otros, la idea es compartir, ayudarse, fomentar la cooperación en pro de la constitución de las tareas que les han sido encomendadas.

En cuanto a Scrum, es necesario tener presente que es [5] *“un proceso en el que se aplican de manera regular un conjunto de buenas prácticas para trabajar colaborativamente, en equipo, y obtener el mejor resultado posible de un proyecto. Estas prácticas se apoyan unas a otras y su selección tiene origen en un estudio de la manera de trabajar de equipos altamente productivos”*. El trabajo colaborativo, tiene como fin la contribución entre los diferentes miembros, permitiendo tener un enfoque total hacia el desarrollo de los objetivos, al respecto, Moreno et al., [6], indica que: *“una de las grandes ventajas de las herramientas colaborativas es que le permite a un grupo de trabajo, realizar proyectos desde lugares remotos, no únicamente desde las instituciones a las cuales están vinculados, lo que genera cambios en términos de tiempo y gastos económicos”*.

Mejorar el trabajo en equipo constituye una tarea continua, una habilidad que se aprende con el tiempo, [7] *“el trabajo en equipo tanto como el trabajo colaborativo, no es fácil de lograr, dadas las diferentes características personales de cada individuo, no obstante, es algo en lo que se puede trabajar, con las directrices apropiadas, es importante considerar aspectos como: apertura a la oportunidad, visualización, planificación, acción, motivación y manejo de emociones negativas”*. Más adelante se verá en este capítulo como por medio de las tecnologías emergentes se pueden fortalecer los equipos y así lograr que sus miembros tengan más ganas de hacer las cosas, sean más colaborativos y manejen mejor sus emociones. En la Figura 1, se puede observar un resumen de las opiniones de los autores anteriormente referenciados en cuanto al trabajo colaborativo.



Figura 1. Trabajo Colaborativo

## 2.1 Trabajo colaborativo en Scrum

[8] *“Un ambiente colaborativo permite el uso de diferentes funcionalidades para la gestión de proyectos de software, de tal manera que permita al equipo de trabajo tener una constante comunicación, notificaciones de cambios en los requerimientos, versiones, ente otras.”*, pues la comunicación es crucial para el logro de las metas propuestas. Hay que tener en consideración en cuanto a Scrum que [9] *“la filosofía ágil usa modelos de organización basados en la gente, en la colaboración y en los valores compartidos”*, necesarios en todo el proceso de este marco de trabajo, evidenciándose en las distintas ceremonias que se realizan a lo largo del ciclo.

Dadas las características de Scrum, se requiere entonces de un ambiente en el cual puedan intervenir sin barreras, Scrum master, Product Owner y Scrum Team, donde el primero según Amézquita [2], *“Es considerado como el rol más importante, ya que, acata como intermediario entre el dueño del producto y el equipo de trabajo, filtrando toda las actividades pertinentes al alcance de cada entregable, y reorganizando los requerimientos adicionales”*, el segundo *“Es la persona encargada de controlar la realización del producto y del valor que este tiene”* y a su vez el tercero, se refiere a *“los desarrolladores, diseñadores y todos los involucrados en la construcción del software”*.

Los equipos principiantes en el marco de trabajo Scrum podrían en algunas ocasiones presentar dificultades para el ambiente colaborativo, por esto la necesidad de una selección adecuada de perfiles y un trabajo permanente con las personas involucradas, con el fin de integrarse y conocerse mejor, pues finalmente todo esto repercute en el producto que se entrega y por supuesto en el resultado del proyecto. Aamir et al., [10], realizaron una investigación, en la cual concluyen que *“en el primer sprint, no lograron resultados satisfactorios, debido a que los integrantes del equipo de desarrollo no tenían experiencia en el ambiente ágil. Sin embargo, con el paso del tiempo, el equipo llegó a familiarizarse con la técnica ágil, más aún, en los próximos 3 Sprints, comenzamos a obtener resultados más satisfactorios en términos de prevención y control de errores, desarrollo rápido y colaboración del equipo”*. Por esto la importancia de buscar estrategias que permitan relaciones entre los miembros del equipo que generen: mayor confianza a nivel grupal, conocimiento de fortalezas, debilidades y sentido de pertenencia. El trabajo colaborativo hoy en día se desarrolla por diferentes medios, algunos de ellos se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.** Ejemplo de trabajo Colaborativo hoy en día

- El almacenamiento en la nube, permite no solo guardar la información en este medio, sino además compartirla con una o más personas, controlarla por medio de versiones.
- El correo electrónico es otra manera de trabajar colaborativamente, pues por medio de este se intercambia y comparte información entre interesados en un tema específico.
- La edición compartida, es ofrecida en la actualidad por diferentes aplicaciones en la Web, por medio de esta, la persona puede modificar un mismo archivo, comentarlo, actualizarlo, de acuerdo con los permisos otorgados por el propietario
- Los foros constituyen una herramienta asincrónica en la cual varias personas pueden comentar acerca de un tema en particular.
- Los chats son usados para hablar 2 o más personas, sobre un tema específico de manera sincrónica.
- Video Conferencia: Son diversas las herramientas que permiten comunicarse por este medio, algunas gratuitas, otras pagadas. Normalmente es usada como medio de aprendizaje o simplemente para comunicarse de manera visual, al instante.
- En cuanto a cuál herramienta escoger, depende definitivamente de la necesidad particular, la cantidad de personas, la particularidad del proyecto, etc., seguramente habrá algunos que, estando ubicados en un mismo lugar, querrán complementar con chats, edición compartida de archivos, tal vez otros, estando remotamente preferirán comunicarse por medio de video conferencia.

### 3. TECNOLOGÍAS QUE EMERGEN

Las empresas, hoy en día se encuentran expuestas a numerosos factores, que de alguna manera constituyen un reto para sus empleados. Por ejemplo: las condiciones de mercado, las tendencias, el entorno, todos estos, aspectos que en un mayor o menor grado ponen a prueba no solo la viabilidad económica, sino también el trabajo en equipo, el compañerismo, las redes colaborativas. Según Bucovetchi et al, [11], *“Los retos con los que grandes firmas se enfrentan cuando usan las redes colaborativas incluyen, asegurarse que los empleados, quienes están en NetWorking tienen un profundo entendimiento de las necesidades de colaboración dentro de la compañía, tanto como la autoridad y la habilidad para a nivel interno soportar estructuras de negociación y compañerismo”*.

La introspección del trabajo colaborativo constituye un factor clave que debe ser fortalecido, pues según Otero [12], *“la búsqueda de talento en 2030 nada tendrá que ver con lo que se ha hecho hasta ahora. Teniendo en cuenta las predicciones anteriores sobre la ‘gig economy’, las empresas seleccionarán a sus trabajadores por su talento para realizar una tarea concreta. En 2030 los trabajadores serán seleccionados alrededor del mundo y podrán trabajar en equipo de manera colaborativa, lo que ayudará a hacer desaparecer las barreras de país”*.

Una manera de fortalecer el trabajo colaborativo es por medio del uso de las tecnologías emergentes, como la que se observa en la Figura 3, aprovechando el contacto virtual para compartir, debatir soluciones, exponer propuestas, en general tener experiencias que generen madurez en el equipo, confianza y sentido de pertenencia organizacional.



**Figura 3.** Realidad Virtual

En cuanto a la perspectiva futura Dell Technologies [13], afirma que *“hasta el 2030, los humanos y las máquinas trabajaran más cerca el uno del otro, transformando vidas. Las tecnologías emergentes, tales como Inteligencia artificial (AI), realidad aumentada (AR), realidad virtual (VR), avances en el internet de las cosas (IoT) y computación en la nube, serán posibles por medio del direccionamiento hacia grandes desarrollos de software, así como también análisis y poder de procesamiento”*. Cada una de estas tecnologías, van a permitir desde diferentes ámbitos cantidad de posibilidades

de comunicación e interacción, optimizando el tiempo, generando oportunidades de negocio, aprendizaje, empleo, entre otros. Algunas de estas tecnologías son:

### 3.1 Head Mounted Display

Dzardanova et al. [14], realizaron un estudio para determinar el grado de sensación de realidad que tienen las personas en un ambiente virtual, utilizando tecnologías como: "head mounted display". Con este fin seleccionó un conjunto de estudiantes universitarios y lo dividió en 3 grupos. Cada uno de los cuales tendría la experiencia de estar en una tienda de ropa. La representación física de cada individuo, estaría dada por medio de la utilización de un avatar. Al ingresar en este mundo, todos se toparían con un espejo, en el que visualizarían su imagen sin ropa alguna. El primer grupo se encontraría solo en el almacén, el segundo y tercer grupo tendrían como personaje adicional a un vendedor. En el segundo grupo dicho vendedor, se desenvolvería de acuerdo con programación de software. En cuanto al tercer grupo, contaría con un actor, que por medio de un avatar ejecutaría este papel. Es de resaltar que ninguno de los dos grupos tendría conocimiento acerca de si este personaje sería real o ficticio.

El resultado de este experimento, muestra que la mayoría sintió vergüenza. Esta fue la evidencia del sentido de realidad que efectivamente vivieron estas personas. En cuanto al vendedor que atendió al tercer grupo, pensaron que era un personaje muy inteligente, aunque no interactuaron bastante con él.

Diversas aplicaciones tienen los HMDs o Head Mounted display, es así como Borba et al. [15], desarrollaron "ITAPEVA 3D", la cual permite tener la experiencia de estar en un sitio arqueológico en Brasil, llamado Abrigo de Itapeva. El autor afirma que la realidad virtual permite tener vivencias realísticas notorias. También indica la manera cómo fue posible desarrollar esta experiencia, utilizando para ello, la captura de la información y el diseño del ambiente en 3D. Quienes participaron en este ambiente virtual, tuvieron efectivamente la sensación de estar inmersos en Itapeva. No obstante, según el autor, algunos pocos inconvenientes se presentaron a nivel de salud o de falta de uso de puntos a los que podrían acceder en algún momento en este sitio arqueológico. Como se puede observar los HMD's presentan diversos usos. Esta es una tecnología que día a día continúan mejorando y que podrá ser de gran ayuda en diversos ámbitos.

Roth et al., [16] efectuaron una investigación, donde presentan lo que ellos denominan: "Socially immersive avatar-based communication", el cual se refiere a la posibilidad de comunicarse con otras personas estando inmersos en un mundo virtual. Cada individuo es representado a través de un avatar, al que le es transmitido las expresiones faciales junto con los movimientos, desenvolviéndose de manera similar a como sería en la realidad. El resultado de esta investigación muestra que existen aspectos por mejorar, los cuales motivan a sus autores, a buscar la manera de perfeccionar por ejemplo la percepción de los movimientos.

Tecnologías como los HMD's, constituyen una oportunidad en muchos ámbitos. En el caso particular de aquellas empresas donde el trabajo colaborativo es relevante para el desarrollo de sus objetivos organizacionales, como es el caso de aquellas que utilizan Scrum, podría ser de gran utilidad, considerando tal como indica Deshpande et al., [17] que *"estar en un mismo sitio no siempre es posible por diferentes razones prácticas y de negocio, esto implica un reto para quienes utilizan el agilidad, debido a las condiciones mismas del agilidad y a la continua colaboración requerida"*.

### 3.2 Interfaces de usuario colaborativas en 3D

Grandi, J. G. [18], se ha propuesto diseñar interfaces colaborativas en 3D, con el fin de demostrar de qué manera trabajan los grupos de personas en estos ambientes. Para ello el autor, plantea 3 metas, las cuales son: *"analizar los efectos de bloquear el grado de libertad de ejecución de grupos en tareas colaborativas, por medio de una interfaz de usuario basada en 3D con dispositivos de mano. La segunda meta es desarrollar una nueva interface en 3D para manipular objetos virtuales en ambientes reales por medio de realidad aumentada. La tercera meta se refiere a explorar diseños en 3D de interfaces de usuario colaborativas, para ambientes virtuales, utilizando para ello HMD's"*.

El resultado de estos experimentos permitirá sentar bases para mejorar cada vez más este tipo de tecnologías, de modo que puedan utilizarse en un futuro cercano, para la interrelación de individuos en un equipo de trabajo, que, aunque se encuentre físicamente disperso, permita reunirlos en un mismo sitio virtual.

### 3.3 Realidad aumentada

Según Ling, H. [19], la realidad aumentada tiene sus inicios en los sesentas. Esta tecnología ha ido avanzando progresivamente con el transcurrir del tiempo, permitiendo diversas posibilidades en áreas de todo tipo. Es así como este autor da a conocer aplicaciones respectivamente, en medicina, educación, entretenimiento, redes sociales y otros. El desarrollo progresivo de esta tecnología, tiene su origen en diversos aspectos, algunos de estos son: progresos científicos, avances en óptica, madurez en técnicas en multimedia. Las tendencias en realidad aumentada apuntan a: percepción de un ambiente en 3D, percepción semántica, fusión de la realidad con la virtualidad, interacción inteligente con la computadora.

En otra investigación presentada por Ozacar et al. [20], da a conocer lo que ellos llaman "Coupled-Clay", el cual permite como ellos afirman; extraer el contorno en 3D de un objeto físico y permitir su manipulación. En otras palabras, el objeto encontrándose ubicado en una región X, puede ser manipulado en una ubicación Y. Esto tiene muchas

aplicaciones en distintos ámbitos, los autores relatan por ejemplo en la promoción de productos. Esta tecnología aún tiene muchos retos por superar, no obstante, en cuanto al trabajo colaborativo, puede ser de gran ayuda, permitiendo a los equipos de trabajo interacciones versátiles, mezclando la realidad con la virtualidad, simulando y previendo situaciones futuras.

Regenbrecht et al., [21], realizaron una investigación relacionada con presencia social por medio de gafas virtuales. El autor indica las desventajas de la comunicación remota por medio de video y realiza un experimento con un grupo de personas. El objetivo es que una persona interactúe con otra en un ambiente virtual, donde pueda ver lo que la otra persona ve y pueda interactuar con objetos. El resultado final, es que, aunque algunos participantes no habían utilizado nunca las gafas virtuales, se sintieron cómodos con ellas y tuvieron una fuerte percepción de realidad.

Las gafas virtuales hoy en día proporcionan un conjunto de experiencias de las cuales se benefician no solo en el ámbito del entretenimiento con juegos o películas sino también muchos otros ámbitos, es así como [22] el mercado de la realidad virtual ha ido creciendo con el tiempo, utilizándose en publicidad, industria automotriz, teléfonos inteligentes. Inclusive su uso se remonta a entrenamientos de tipo militar y de apoyo en procesos de tipo Psicológico.

### 3.4 Espacios virtuales colaborativos

Rodríguez, D. et al. [23], presentaron la propuesta de un arquetipo de arquitectura de espacios virtuales colaborativos, con el fin de utilizarlos en una asignatura universitaria. Tomando como base herramientas como HTML5, Python, Ccs3, Mysql, WebRTC. Este último es [24] *“también conocido como Web Real-Time Communications, es un proyecto de código abierto – promovido por Google, Mozilla y otros – que permite comunicaciones en tiempo real sin plug-ins a través de una API Javascript. Facilita las aplicaciones de llamadas de voz, chat de video y compartimiento de archivos entre navegadores”*. Estos autores se basaron en la necesidad latente para el teletrabajo, así como también aquellos estudiantes que por diferentes motivos no pueden estar en un sitio y horario fijos. Este tipo de tecnologías aportan en la actualidad al trabajo colaborativo. Más adelante con refinamientos y ajustes tal vez por medio de realidad virtual, inteligencia artificial, realidad aumentada y los diversos avances, podría acercarse a una experiencia de trabajo colaborativo cada vez más cercano a la realidad física.

### 3.5 Holografía

La Tecnología 7D, permite percibir lugares, personas, animales, etc., los cuales estando en su hábitat, pueden aparecer en espacios diferentes, algo parecido a los hologramas que se muestran en la película de la guerra de las galaxias. Actualmente se están efectuando pruebas, tal como indica, Peña, W. [25] *“La tecnología 7D está siendo analizada en Japón como una solución que evitaría el sufrimiento de los animales que viven en cautiverio en los zoológicos”*, de esta manera, las personas tendrían la posibilidad de visualizar los animales sin peligro alguno y los animales a su vez pueden estar tranquilos en su entorno natural.

La tecnología 3D, también proporciona grandes posibilidades, PR, N. [26], desarrolló un visor holográfico llamado Voxbox de 8 pulgadas, el cual permite visualizar imágenes de forma tridimensional, según el autor *“diferentes industrias pueden beneficiarse de la holografía. Arquitectos e ingenieros pueden ver los detalles de sus proyectos como hologramas de una manera fácilmente entendible. Los profesionales inmobiliarios pueden usar la holografía para fines publicitarios, con el fin de proporcionar modelos a color y en 3D, y así de esta manera promocionar, tipos de propiedades sin dejar la oficina”* Esta tecnología tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo, el autor resalta su uso en medicina, para observar bajo las 3 dimensiones una parte del cuerpo humano y así tener mejores bases para la toma de decisiones en los diagnósticos requeridos.

### 3.6 Gamificación – Realidad Virtual

Los juegos a lo largo de la historia, han constituido formas de distracción que permiten a las personas sumergirse en otros mundos, olvidarse de las presiones o el estrés del día a día. [27] *“la gamificación se centra en el uso de elementos del diseño de juegos en contextos que no son de juego. Aunque la gamificación se asocia principalmente con la tecnología digital, esta no está únicamente relacionada con medios digitales”*.

Gasca-Hurtado et al., [28], propusieron un videojuego basado en realidad virtual, con el fin de mejorar el trabajo en equipo entre un grupo de estudiantes de Ingeniería, aprovechando el nivel de realismo que esta tecnología ofrece. El juego consistía en armar un barco donde los participantes serían representados mediante avatares, tendrían retos que deberían cumplir entre otros, fomentando de esta manera el trabajo colaborativo. Esta tecnología brinda oportunidades que permiten entrenar a un grupo de personas, como estudiantes o profesionales de distintos ámbitos, quienes podrían adquirir mayor capacidad de trabajo en equipo, socialización y motivación, permitiendo a sus miembros desinhibirse, actuar con mayor libertad por estar en un juego, crear lazos de confianza y seguridad, de modo que, al desenvolverse en una situación real, tendrían las bases para actuar en concordancia con lo aprendido.

## 4. RESULTADOS

El trabajo colaborativo en Scrum, con el uso de tecnologías como Head Mounted Display, se vería beneficiado, en un mundo globalizado, donde los clientes e inclusive desarrolladores o diseñadores se encuentren ubicados en diferentes

partes del mundo, utilizando Avatares, teniendo reuniones en espacios virtuales, donde puedan interactuar como grupo y realizar así las reuniones que de por sí contempla este marco de trabajo. La realidad aumentada a nivel colaborativo en proyectos con Scrum, permitiría de acuerdo con el tipo de proyecto, obtener información específica, manipular objetos o materiales, que tal vez podría ser útil, para un mayor entendimiento de un producto, proceso o diseño.

Dependiendo del progreso en las tecnologías holográficas 7D, en un ambiente colaborativo bajo el marco de trabajo Scrum, sería posible que los equipos de trabajo dispersos geográficamente, puedan seleccionar un espacio, de modo que, sin usar head mounted display, puedan tener un espacio físico en el cual consigan verse y comunicarse. Esta tecnología tiene aún aspectos por mejorar, por ejemplo, en la interacción, para de esta manera facilitar la colaboración en las distintas ceremonias Scrum, ya sea la resolución de impedimentos o la gestión del aprendizaje de los miembros del equipo.

La holografía 3D, podría permitir explorar mejor un producto, lo cual, de acuerdo con las circunstancias facilitaría la toma de decisiones, el aprendizaje, el trabajo colaborativo. En Proyectos con Scrum, tendría aplicaciones por ejemplo en el Sprint Grooming, Product Backlog. Las tecnologías emergentes tienen diversas posibilidades en el marco de trabajo Scrum. La selección dependerá de la necesidad específica. En la Tabla 1, se indican algunas posibles aplicaciones.

**Tabla 1.** Uso de Tecnologías emergentes en Scrum

<b>Tecnología</b>	<b>Posible aplicación en Scrum</b>
Head Mounted Display Virtual Glasses Espacios virtuales colaborativos	Todas las ceremonias Scrum, para participación en las diversas reuniones
Gamificación	Serviría mucho antes del planning, para que el equipo se conozca más, se fortalezcan más las relaciones interpersonales y sirva de entrenamiento en Scrum
Tecnología 3D	En la definición del Sprint Backlog o Sprint Grooming, con el fin de precisar elementos de diseño que puedan ser de utilidad para el proyecto
Tecnología 7D	Aplicable a todas las ceremonias de Scrum, cuando se requiera tener una visualización e interacción directa con los miembros del equipo, por ejemplo en la retrospective.
Realidad Aumentada	En la definición del Sprint Backlog o Sprint Grooming, con el fin de precisar elementos de diseño que puedan ser de utilidad para el proyecto

## 5. CONCLUSIONES

El ambiente colaborativo como una de las características de Scrum, se ve beneficiado gracias a las tecnologías actuales de chats, video conferencia, documentos compartidos en la nube, entre otros, que proporcionan un conjunto de facilidades independientemente del sitio origen de cada uno de los miembros, de modo que lo único que hace falta, es que los miembros del equipo sientan que están juntos en un salón, no a una gran distancia. Esto último constituye un reto, una oportunidad para las tecnologías emergentes, que actualmente son refinadas, probadas y ajustadas por investigadores alrededor de todo el mundo, para de este modo hacer posible que virtualmente se rompan las barreras del espacio geográfico

Existen tecnologías emergentes aquí descritas, con las cuales, algunas personas muestran efectos secundarios, un ejemplo de esto, son los head mounted display. No obstante, las investigaciones y el permanente avance tecnológico para mejorar la experiencia continua, de modo que con el tiempo pueda utilizarse desde diferentes ámbitos, sea a nivel comercial, inmobiliario, de ingeniería, medicina, etc.

Las ventajas que podría proporcionar en el caso de Scrum, son bastantes no solo para la realización de las diferentes ceremonias, sino también además para el fortalecimiento de los equipos, que independientemente de las distancias, podrían reunirse de manera virtual, tal vez con avatares como representación de cada miembro, en lugares condicionados para que puedan interactuar entre sí, estar en un ambiente en el cual se sientan confiados, tranquilos, de modo que puedan conocerse mejor, socializar, fortalecerse como equipo, aplicar el principio de auto gestionarse, lograr los objetivos planteados para cada Sprint, minimizar riesgos, resolver impedimentos, aclarar dudas, aprovechar los conocimientos o experiencias de otros.

Tecnologías como gamificación por medio de realidad virtual, podría permitir a grupos de personas, entrenarse en el trabajo colaborativo. El logro de los diferentes retos que les surgen a lo largo del desarrollo del juego, constituye de por sí un incentivo, que probablemente podría ayudarles a mejorar la confianza. La socialización les lleva a un trabajo en equipo y como consecuencia al logro de los objetivos propuestos.

Los avances en tecnologías 7D, hacen pensar en la posibilidad que, en un tiempo, con mejoras en diferentes aspectos, pueda permitir a personas trabajar en teletrabajo, teniendo la posibilidad de estar por medio de esta tecnología en reuniones a kilómetros del sitio en el cual físicamente se encuentra, por medio de representaciones de hologramas interactivos.

El uso de estas herramientas colaborativas, traen como consecuencia un conjunto de ventajas, como el ahorro en costos por transporte, mayor calidad de vida, aprovechamiento del tiempo, oportunidades para conocer como equipo las fortalezas y debilidades y así tomar medidas necesarias para mejorar y no afectar el desarrollo de las tareas.

## REFERENCIAS

- [1] Castillo, L. (2018). Resultados preliminares más significativos tras cuatro años de aplicación de la metodología SCRUM en las prácticas de laboratorio. *ReVisión* 11(1), 5.
- [2] Amézquita, R. (2015). Análisis de la aplicación de la metodología SCRUM como complemento de las metodologías del PMI para el control de proyectos de desarrollo de software. Bachelor's thesis. Universidad Militar Nueva Granada.
- [3] Jurado, J. & Pardo, C. (2013). La Gestión De Proyectos Software - Una Prospectiva En La Aplicación De Estrategias En La Ingeniería Colaborativa. *Lámpsakos* 9(1), 26-33.
- [4] López, M. & Vázquez, O. (2015). Aprendizaje Colaborativo basado en proyectos desarrollados en Ingeniería. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo* 10, 14-23.
- [5] [Qué es Scrum](#). *Proyectosagiles.org*. Online [May 2018].
- [6] Moreno, E. et al. (2014). Planificando una metodología de trabajo colaborativo para la resolución de actividades grupales domiciliarias. In XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.
- [7] Voogt, J. et al. (2015). Collaborative design as a form of professional development. *Instructional Science*, 43(2), 259-282.
- [8] Blanco D. & Cortés, M. (2014). *Ambientes Colaborativos*. Pontificia Universidad Javeriana.
- [9] Londoño, E. (2016). Formulación de una metodología para la gestión de proyectos de desarrollo de software, a través de principios y prácticas ágiles con enfoque PMI. Bachelor's thesis. Universidad Militar Nueva Granada.
- [10] Aamir, M., & Khan, M. (2017). Incorporating quality control activities in scrum in relation to the concept of test backlog. *Sādhanā* 42(7), 1051-1061.
- [11] Bucovetchi, O. et al. (2017). Improvements in business towards system of systems engineering approach. *Calitatea* 18(S1), 308-321.
- [12] Otero, M. (2018). *Tecnologías emergentes: ¿Cómo será el mundo en 2030?* BBVA.
- [13] [Delltechnologies.com](#). (2017). [Dell Technologies 2018 Predictions – Entering the Next Era of Human Machine Partnerships](#). Online [Apr 2018]
- [14] Dzardanova, E. et al. (2017). Affective impact of social presence in immersive 3D virtual worlds. In IEEE Symposium on Computers and Communications.
- [15] Borba, E. et al. (2017). Itapeva 3D: Being Indiana Jones in virtual reality. In *Virtual Reality (VR), 2017 IEEE* (pp. 361-362). IEEE.
- [16] Roth, D. et al. (2017). Socially immersive avatar-based communication. In *2017 IEEE Virtual Reality*.
- [17] Deshpande, A. et al. (2016). Remote working and collaboration in agile teams. In: *International Conference on Information Systems*.
- [18] Grandi, J. (2017). Design of collaborative 3D user interfaces for virtual and augmented reality. In *2017 IEEE Virtual Reality*.
- [19] Ling, H. (2017). *Augmented Reality in Reality*. *IEEE MultiMedia* 24(3), 10-15.
- [20] Ozacar, K. et al. (2015). Coupled-clay: Physical-virtual 3D collaborative interaction environment. In *2015 IEEE Virtual Reality*.
- [21] Regenbrecht, H. et al. (2015). Social presence with virtual glass. In *2015 IEEE Virtual Reality*.
- [22] *3D VR*. (2018). [Virtual Reality Glasses Market To Grow Owing To Rising Adoption In Advertising, Gaming And Automotive Industry Till 2022 | Million Insights](#). Online [Apr 2018].
- [23] Rodríguez, D. et al. (2015). Espacio virtual de trabajo colaborativo académico (EVTCA). In X Congreso sobre Tecnología en Educación & Educación en Tecnología.
- [24] *3cx*. [¿Qué es WebRTC](#). Online [Apr 2018].
- [25] Peña, W. (2016). Zoológicos virtuales con tecnología 7D. *PC World en español*.
- [26] PR (2015). *Holographic Optical Technologies Launches Kickstarter, Offering True 3D Holograms*. *PR Newswire US*.
- [27] Contreras, R. & Eguía, J. (2017). Gamificación en educación: diseñando un curso para diseñadores de juegos. *Kepes* 14(16), 91-120.
- [28] Gasca, G. et al. (2015). Realidad virtual como buena práctica para trabajo en equipo con estudiantes de ingeniería. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação* (16), 76-91.

# Desarrollo de Software para Análisis Estructural con Elementos Tipo Barra en 3D Utilizando MATLAB

Mauricio Paz G.<sup>1</sup>

José M. Villegas<sup>2</sup>

Allen Castillo<sup>3</sup>

Universidad Autónoma de Baja California  
Tijuana – México

Este trabajo está enfocado al análisis de elementos tipo barras con un programa desarrollado en la plataforma de MATLAB. El programa desarrollado ayuda a analizar numerosas estructuras entregando los resultados visuales y numéricos de desplazamientos, esfuerzos y reacciones. Se desarrolló un programa GUI en MATLAB basado en la técnica de elementos finitos para generar resultados numéricos de desplazamientos, reacciones y esfuerzos. Los resultados obtenidos del programa MATLAB para una estructura tridimensional con tres elementos tipo barra se validaron con los valores entregados por el software especializado en análisis estructural ANSYS, el porcentaje de error relativo máximo entre ambos resultados fue del 0.07% para el caso analizado. El programa desarrollado permite al usuario analizar una gran variedad de estructuras con elementos tipo barras orientadas en el espacio 3D con menor tiempo y esfuerzo obteniendo resultados precisos, ya que el método utilizado es el Análisis de elementos finitos, siendo muy útil y eficaz para analizar la estructuras.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una estructura en el espacio 3D se puede analizar por medio de elementos tipo barras, considerando que los elementos se encuentran conectados en sus extremos a otras barras por juntas de pasador, en estas uniones es posible aplicar fuerzas en las tres direcciones y determinar las fuerzas de reacción en las uniones que se encuentran con restricciones de frontera [1].

Un elemento tipo barra es analizado en una dirección cuando se encuentra empotrado en un extremo y se le aplica una fuerza de manera axial en el extremo libre. Cuando todos los elementos y las fuerzas externas se encuentran en el mismo plano, la estructura se considera como armadura en 2 direcciones o dos planos. Por otro lado, si los elementos de la estructura se encuentran en un espacio tridimensional, es considerada como un análisis estructural 3D o estructuras espaciales, las fuerzas se pueden aplicar en los tres sistemas coordenados [2, 3]. En el presente trabajo se desarrolla el código en MATLAB para analizar estructuras espaciales tipo barras 3D [2].

Una estructura permite soportar fuerzas y garantizar la estabilidad y seguridad en cada uno de sus componentes. El cálculo de estructuras y sistemas de armaduras se ha analizado continuamente para optimizar el peso, mejorar la apariencia aumentar las propiedades mecánicas y disminuir el tiempo de construcción, existen numerosas aplicaciones de estructuras 3D presentes en estadios, fabricas, puentes, grúas, hangares, torres de electricidad, etc.

Para analizar las estructuras, el método utilizado es el Análisis de elementos finitos. El método de elementos finitos (FEM) es una técnica numérica para encontrar soluciones aproximadas a problemas de valores límite para ecuaciones en derivadas parciales. Incluye el uso de técnicas de generación de malla para dividir un problema complejo en pequeños elementos, así como el uso de un programa de software codificado con algoritmo FEM [4]. El análisis de elementos finitos abarca métodos para conectar muchas ecuaciones de elementos simples sobre muchos subdominios pequeños, llamados elementos finitos, para aproximar una ecuación más compleja sobre un dominio más grande. Hoy en día, este método se utiliza no solo para el análisis en mecánica de sólidos, sino también en el análisis de flujo de fluidos, transferencia de calor, campos eléctricos y magnéticos y muchos otros. Los ingenieros aeronáuticos y aeroespaciales utilizan este método ampliamente para el análisis de vigas, marcos espaciales, placas, proyectiles, placas plegadas, los casos anteriores se pueden analizar de manera estática y dinámica [2].

Existen numerosos problemas que pueden ser manejados por análisis de elementos finitos. Este método se utiliza ampliamente para el análisis y diseño de barcos, aeronaves, naves espaciales, motores eléctricos y motores térmicos. Para analizar las estructuras se usan lenguajes de programación de computadora como MATLAB, FORTRAN y diferentes softwares como ANSYS, ABAQUS, SOLIDWORKS, ALGOR, NASTRAN, FEMAP, etc. [5, 6].

Se eligió el software MATLAB para el desarrollo del programa ya que tiene muchas herramientas integradas que simplifican el funcionamiento de operaciones matriciales, dichas operaciones son necesarias para el desarrollo del método de elementos finitos aplicado a un análisis estructural. MATLAB es una herramienta para hacer cálculos numéricos con matrices y vectores. La programación en este software permite proporcionar una solución rápida y precisa de armaduras. También puede mostrar información gráficamente. Matlab es útil en el cálculo de matrices de orden complejas y grandes [7, 9]. Este capítulo consta de codificación MATLAB para análisis de elementos finitos tipo

---

<sup>1</sup> mauricio.paz@uabc.edu.mx

<sup>2</sup> villegas\_josemanuel@uabc.edu.mx

<sup>3</sup> allen.castillo@uabc.edu.mx



barras en 3D. El programa desarrollado permite tener una interfaz gráfica, la cual brinda al usuario un ambiente amigable, además muestra los resultados de desplazamientos nodales graficando la deformación de los elementos deformados contra la configuración geométrica inicial (sin deformación).

## 2. MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El procedimiento utilizado en el análisis estructuras 3D en el método de elementos finitos comprende varios pasos. El procedimiento por pasos se puede dividir de la siguiente manera [8]:

1. *Seleccione la variable de campo adecuada y los elementos:* En el primer paso en FEM, seleccionar los elementos alámbricos tipo barras en 3D. Los nodos generalmente se colocan en los extremos de los elementos y, si es necesario para una mayor precisión, se pueden colocar nodos adicionales a lo largo del elemento.
2. *Discretice el continuo:* En este paso, toda la armadura se divide en pequeños elementos. Estos elementos coinciden con la geometría de la estructura. Para el análisis de armaduras se usan elementos alámbricos tipo barras.
3. *Encontrar propiedades del elemento:* Después de seleccionar el elemento y las incógnitas nodales, el siguiente paso en el análisis de elementos finitos es ensamblar las propiedades de los elementos para cada elemento, que incluye el área (A) y el módulo elástico (E). La longitud se determina considerando las coordenadas de cada nodo y los cosenos de dirección de cada elemento. Se calcula la matriz de rigidez de cada elemento en el sistema de coordenadas local con numeración local.

Para las barras: elemento de armadura 3-D (Figura 1). La dirección de las barras se determina con los cosenos directores con las ecuaciones (1) a (5) [7, 10].

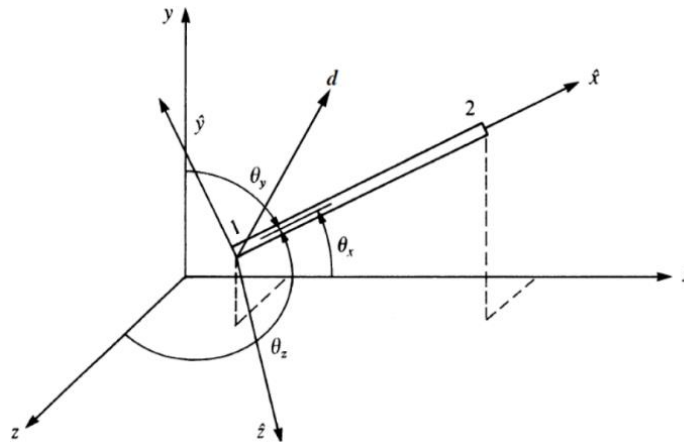


Figura 1. Proyecciones de un elemento 3D en X, Y, Z [10]

$$C_x = \frac{x_2 - x_1}{L} \quad (1)$$

$$C_y = \frac{y_2 - y_1}{L} \quad (2)$$

$$C_z = \frac{z_2 - z_1}{L} \quad (3)$$

$$L = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$C_x = \cos \theta_x \quad C_y = \cos \theta_y \quad C_z = \cos \theta_z \quad (5)$$

Donde  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$  representan los cosenos directores en dirección X, Y, Z respectivamente, y L representa la longitud de cada elemento.

4. *Ensamblar las propiedades globales:* Las propiedades del elemento se usan para ensamblar propiedades globales para obtener ecuaciones del sistema. La matriz de rigidez global se ensambla con la ayuda de la matriz local de rigidez de todos los elementos [k]. La matriz para un elemento tipo barra en 3D se representa con la ecuación (6).

$$k = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z & -C_x^2 & -C_x C_y & -C_x C_z \\ C_y C_x & C_y^2 & C_y C_z & -C_y C_x & -C_y^2 & -C_y C_z \\ C_z C_x & C_z C_y & C_z^2 & -C_z C_x & -C_z C_y & -C_z^2 \\ -C_x^2 & -C_x C_y & -C_x C_z & C_x^2 & C_x C_y & C_x C_z \\ -C_y C_x & -C_y^2 & -C_y C_z & C_y C_x & C_y^2 & C_y C_z \\ -C_z C_x & -C_z C_y & -C_z^2 & C_z C_x & C_z C_y & C_z^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

5. *Condiciones de frontera*: Las condiciones de frontera se colocan para encontrar la solución de ecuaciones del sistema. Mediante el uso de las condiciones de frontera se llevó a cabo la reducción de la matriz global de rigidez. El cálculo de los desplazamientos se llevó a cabo usando la ecuación (7).

$$[K][d] = [F] \quad (7)$$

Donde F es la carga externa. K es matriz de rigidez reducida. d es la matriz de desplazamiento. Los cálculos adicionales de la reacción y las tensiones se llevan a cabo de la siguiente manera. La reacción se calcula con la siguiente expresión.

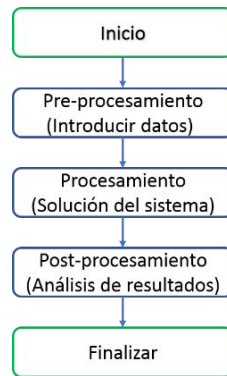
$$R = [K][d] - [q] \quad (8)$$

La ecuación (9) sirve para determinar el esfuerzo en cada uno de los elementos:

$$\underline{\delta} = \frac{E}{L} \begin{bmatrix} -C_x & -C_y & -C_z & C_x & C_y & C_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{ix} \\ d_{iy} \\ d_{iz} \\ d_{jx} \\ d_{jy} \\ d_{jz} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

### 3. DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE MATLAB

El proceso de ejecución de la aplicación de Matlab se muestra en la Figura 2 [11].



**Figura 2.** Diagrama de flujo para la ejecución de MATLAB

1. *Pre-procesamiento*: En la etapa de pre-procesamiento se definen parámetros del problema para el análisis estructural, incluye la construcción de la geometría, las propiedades físicas de la sección transversal, las cargas aplicadas y las restricciones nodales. La etapa de procesamiento resuelve el problema definido en la etapa de pre-proceso utilizando el método de elementos finitos. La solución contiene los desplazamientos nodales desconocidos y las fuerzas de reacción en los nodos restringidos [10]. En el primer paso, la creación de la geometría se realizó seleccionando la estructura como una armadura 3D. Luego, la geometría del problema se definió en términos de nodos y elementos. Los nodos tienen tres propósitos en el análisis y son: a) utilizados para definir la conectividad del elemento, b) aplicar carga, c) aplicar condición de frontera. La longitud de los elementos y los cosenos de dirección requeridos para la construcción de las matrices de rigidez de los elementos y las matrices de transformación se calculan utilizando las coordenadas del nodo final con la ecuación antes mencionada.
2. *Procesamiento*: Después de aplicar las condiciones de cargas nodales y condiciones de frontera en los soportes, es necesario realizar el proceso de compilado a esta etapa se le conoce como procesamiento, en el cual es necesario realizar la construcción de las matrices de rigidez para cada elemento, seguido de un ensamble global de matrices de rigidez que representa la configuración geométrica y rigidez de la estructura global, posteriormente se colocan los valores de carga y condiciones de frontera en los vectores de fuerza y desplazamiento, finalmente se resuelve el sistema matricial, cada una de las etapas del procesamiento de enlistan a continuación:
  - Matriz de rigidez del elemento en coordenadas globales.
  - Matriz de transformación de elementos.
  - Construcción de la matriz de rigidez estructural.
  - Partición de la matriz de rigidez estructural.
  - Preparar el vector de desplazamiento.
  - Partición del vector de desplazamiento.
  - Preparar vector de carga / vector de carga de partición.
  - Solución del sistema matricial
3. *Post-procesamiento*: En esta etapa el programa presenta la deformación para cada uno de los elementos en forma gráfica antes y después de aplicar la carga, también se muestran los valores obtenidos para las fuerzas de reacción, valores de esfuerzo en cada elemento y las distancias de los desplazamientos nodales en las direcciones X, Y, Z.

#### 4. ANÁLISIS DE LA PROPUESTA DE ESTRUCTURA TIPO BARRA

Este documento considera un ejemplo de elementos tipo barra en 3D: La estructura 3D tipo barra propuesta está constituida por 3 barras que se encuentran conectadas en sus extremos. El módulo de elasticidad del material utilizado es de  $1.2 \times 10^6$  Psi. El área de cada una de las secciones y las coordenadas para los nodos se presentan en la Figura 3, la carga aplicada es de 1000 lbf en dirección -Z [6, 10].

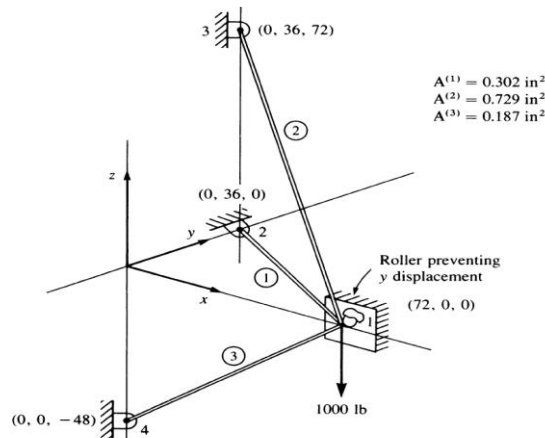


Figura 3. Planteamiento del modelo de estructura 3D [10]

La entrada de datos al programa MATLAB fue de manera simultánea en un ambiente gráfico, los valores que se proporcionaron son: las propiedades de los materiales, las coordenadas de cada uno de los nodos en el sistema de referencia X, Y, Z en coordenadas globales. El área de la sección transversal de cada elemento. Las conectividades existentes entre los elementos y datos de carga nodal, la forma de introducir estos datos se observa en las Figuras 4a y 4b.

Coordenadas de los nodos	<input type="text" value="[72 0 0; 0 36 0; 0 36 72; 0 0 -48]"/>	m o in
Unión de los nodos	<input type="text" value="[1 2; 1 3; 1 4]"/>	
Condiciones de frontera	<input type="text" value="[2 4:12]"/>	

Figura 4a. Introducción de valores geométricos y condiciones de frontera en MATLAB

Elasticidad	<input type="text" value="1.2e6"/>	Pa o PSI
Área	<input type="text" value="[ 0.302 ; 0.729 ; 0.187]"/>	m^2 o in^2
Fuerza	<input type="text" value="-1000"/>	N o lbf
		Carga en DOF# <input type="text" value="3"/>

Figura 4b. Introducción de valores de área, modulo elástico y fuerzas en MATLAB

Los elementos tipo barras, están constituidos por dos nodos, uno en cada extremo, los nodos para estos tipos de elementos tienen tres grados de libertad, para este análisis se puede apreciar que existen cuatro nodos en la estructura 3D y 12 grados de libertad de manera global. Se definieron y almacenaron los valores conjuntos y sus correspondientes direcciones de restricciones. Los datos de propiedad del material se definieron almacenando el módulo de elasticidad como E. En los datos de propiedad de la sección transversal, las áreas transversales se almacenaron como una variable (A). El programa permite colocar las condiciones de carga externa mediante el valor y dirección aplicándolo en el grado de libertad del nodo requerido. Las ubicaciones de los nodos se especifican con los componentes en X, Y, Z, separadas por punto y coma para cada nodo. Los grados de libertad restringidos se asignaron con el comando Dof prescrito, es decir todos los grados de libertad inicialmente son nulos para cada nodo. Los grados de libertad que no están restringidos se asignaron con el comando Dof activo, en este caso el grado de libertad 1 y 3 están activos y representa que el nodo 1 se encuentra libre en la dirección X y Z y soportado en dirección Y: las figuras siguientes muestran los datos de entrada generados por el usuario. El programa puede calcular la cantidad de nodos y la cantidad de elementos.

El procesamiento del análisis de la armadura se llevó a cabo. La ejecución y los resultados de la armadura fueron los siguientes. Al preparar todos los datos de entrada necesarios para el análisis de la estructura en forma de m-file, estos archivos se adjuntaron al programa para su procesamiento. En el procesamiento se calcularon todas las matrices de rigidez de los miembros, lo que condujo a la compilación de la matriz de rigidez global. Después de la aplicación de las condiciones de contorno, se obtuvo una matriz de rigidez reducida siguiendo la función que se muestra en la Figura 5.

```

57 -
58 - stiffness=zeros(GDof);
59 - for e=1:numberElements;
60 -     indice=elementNodes(e,:);
61 -     elementDof=[3*indice(1)-2 3*indice(1)-1 3*indice(1)...
62 -               3*indice(2)-2 3*indice(2)-1 3*indice(2)];
63 -     x1=nodeCoordinates(indice(1),1);
64 -     y1=nodeCoordinates(indice(1),2);
65 -     z1=nodeCoordinates(indice(1),3);
66 -     x2=nodeCoordinates(indice(2),1);
67 -     y2=nodeCoordinates(indice(2),2);
68 -     z2=nodeCoordinates(indice(2),3);
69 -     L = sqrt((x2-x1)*(x2-x1) + (y2-y1)*(y2-y1) +...
70 -           (z2-z1)*(z2-z1));
71 -     CXx = (x2-x1)/L;CYx = (y2-y1)/L;CZx = (z2-z1)/L;
72 -     T = [CXx*CXx CXx*CYx CXx*CZx ; CYx*CXx CYx*CYx CYx*CZx ; ...
73 -         CZx*CXx CZx*CYx CZx*CZx];
74 -     stiffness(elementDof,elementDof)=...
75 -     stiffness(elementDof,elementDof)+E*A(e)/L*[T -T ; -T T];
76 - end

```

Figura 5. Código de MATLAB para determinar la matriz de rigidez global

Se creó el vector de carga nodal del elemento, usando esto y se calcularon los desplazamientos y las reacciones de la matriz de rigidez reducida (Figuras 6 y 7).

```

84 - displacements=zeros(GDof,1);
85 - displacements(activeDof)=U;
86 -
87 - disp('Displacements')
88 - jj=1:GDof; format
89 - desplazamiento=[jj' displacements]
90 -
91 - F=stiffness*displacements;
92 - reactions=F(prescribedDof);
93 - disp('reactions')
94 - reaccion=[prescribedDof reactions]

```

Figura 6. Código de MATLAB para determinar los desplazamientos

```

97 - fprintf('Stresses in elements\n')
98 - ff=zeros(numberElements,6); format
99 - for e=1:numberElements;
100 -
101 -     indice=elementNodes(e,:);
102 -     elementDof=[3*indice(1)-2 3*indice(1)-1 3*indice(1)...
103 -               3*indice(2)-2 3*indice(2)-1 3*indice(2)];
104 -     x1=nodeCoordinates(indice(1),1);
105 -     y1=nodeCoordinates(indice(1),2);
106 -     z1=nodeCoordinates(indice(1),3);
107 -     x2=nodeCoordinates(indice(2),1);
108 -     y2=nodeCoordinates(indice(2),2);
109 -     z2=nodeCoordinates(indice(2),3);
110 -     L = sqrt((x2-x1)*(x2-x1) + (y2-y1)*(y2-y1) +...
111 -           (z2-z1)*(z2-z1));
112 -     CXx = (x2-x1)/L;CYx = (y2-y1)/L;CZx = (z2-z1)/L;
113 -
114 -     u=displacements(elementDof);
115 -     member_stress(e)=E/L*[-CXx -CYx -CZx CXx CYx CZx]*u;
116 -     fprintf('%3d %12.5f\n',e, member_stress(e));
117 - end
118 - esfuerzo=member_stress;

```

Figura 7. Código de MATLAB para determinar los esfuerzos

Después de realizar los cálculos el programa desarrollado entrega los resultados de desplazamiento, de reacción en los nodos empotrados y los valores de esfuerzos para cada elemento tipo barra, también se grafica la estructura deformada después de aplicar la carga (Figuras 8 y 9).

Desplazamientos (m o in)		Reacciones (N o lbf)		Esfuerzos (Pa o PSI)
1	-0.0711144	2	-223.1632	-948.19142
2	0	4	256.1226	1445.3684
3	-0.266239	5	-128.0613	-2868.5433
4	0	6	0	
5	0	7	-702.4491	
6	0	8	351.2245	
7	0	9	702.4491	
8	0	10	446.3264	
9	0	11	0	
10	0	12	297.5509	
11	0			
12	0			

Figura 8. Resultados de desplazamiento, reacciones y esfuerzo

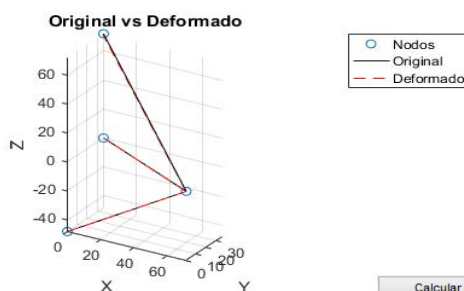


Figura 9. Grafica de nodos, estructura original y deformada

En la Figura 10 se presentan la interfaz desarrollada para realizar análisis de estructuras tridimensionales con elementos tipo barras. Se presentan las partes principales del programa, existen cajas para realizar la entrada de datos del módulo elástico, área de la sección transversal, fuerza, condiciones de frontera, coordenadas de los nodos y las conexiones entre los nodos de cada elemento. También presenta los resultados obtenidos de los desplazamientos, fuerzas de reacción y esfuerzos, finalmente se presenta la gráfica en la que se presentan la estructura inicial, la estructura deformada después de aplicar la carga. La grafica se puede controlar con el paneo y acercamientos.

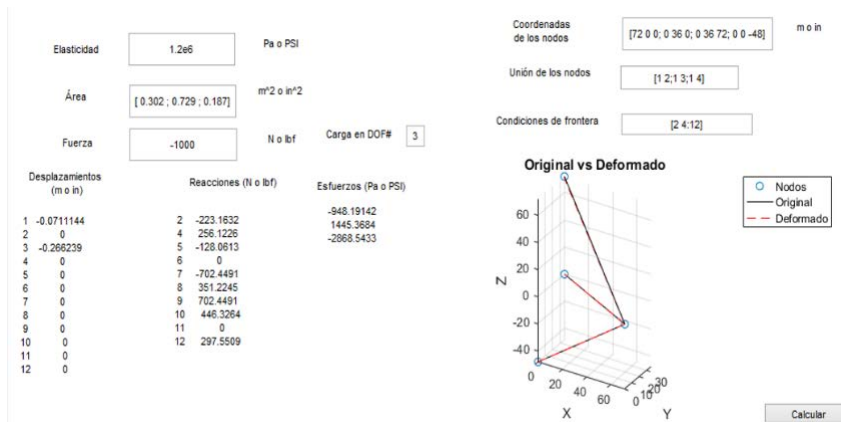


Figura 10. Interfaz de software para análisis estructural en MATLAB

## 5. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ANSYS Y LA APLICACIÓN DESARROLLADA

El análisis del programa también se realizó en el programa ANSYS 18.1 con la finalidad de comparar los resultados obtenidos entre ambos métodos. Las siguientes figuras muestran los resultados de desplazamientos, reacciones y esfuerzos. La estructura 3D se analizó con el programa ANSYS en el módulo STATIC STRUCTURAL en donde se crearon los nodos con las coordenadas correspondientes para cada uno de ellos, se agregó el módulo elástico del material, se colocaron las condiciones de frontera en los nodos 2, 3 y 4 con la configuración fija, es decir sin desplazamiento rotacional y direccional en los tres ejes. Para el nodo 1 se eliminó el desplazamiento en dirección Y, la carga aplicada en el nodo 1 fue de -1000 lbf, las propiedades de área se agregaron de acuerdo con el elemento correspondiente, la Figura 11 muestra las condiciones de carga y restricciones de frontera para el problema analizado.

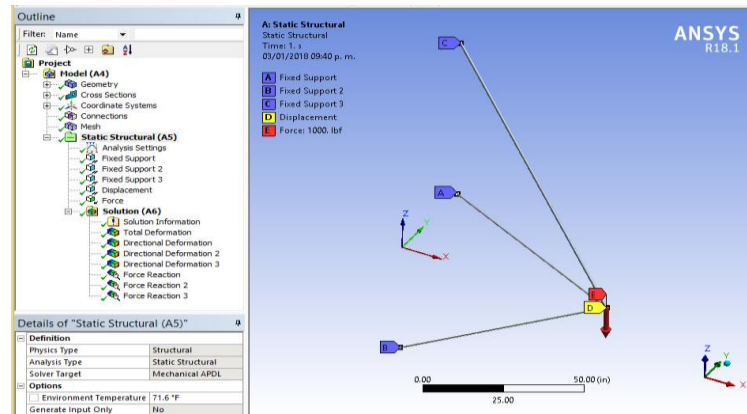


Figura 11. Condiciones de carga y de frontera en ANSYS

Los resultados de desplazamiento direccional en X, Y, Z, obtenidos con la simulación realizada en el software ANSYS se muestran en las Figuras 12a, 12b y 12c.

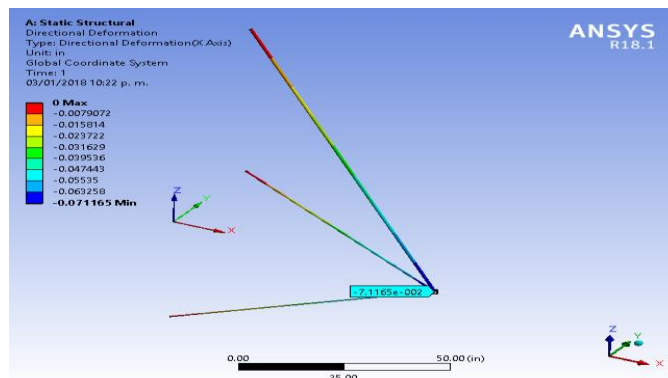


Figura 12a. Desplazamiento de dirección X

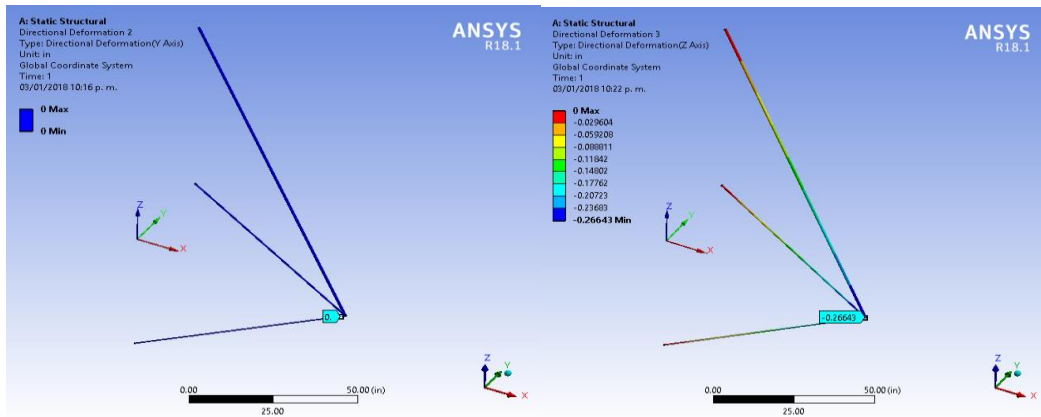


Figura 12b. Desplazamiento de dirección Y Figura 12c. Desplazamiento de dirección Z

En la Figura 13 se observan los resultados de desplazamientos: a) en X, b) en Y y c) en Z.

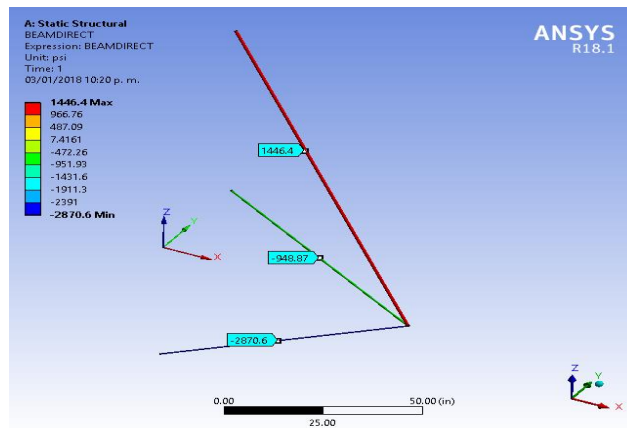


Figura 13. Resultado de esfuerzos axiales en Psi

Los resultados obtenidos con el programa desarrollado en MATLAB y ANSYS respectivamente se comparan para obtener el porcentaje de error relativo entre ellos, estos resultados se pueden apreciar en las Tablas 1, 2 y 3. Las cuales presentan los resultados de desplazamiento, reacciones y esfuerzos respectivamente. En la Tabla 1, se tienen los resultados del desplazamiento para cada nodo en dirección X, Y, Z, con los dos métodos antes mencionados, el porcentaje de error relativo máximo es del 0.07% para el desplazamiento en dirección Z. En la Tabla 2, se muestran los resultados de las reacciones en los nodos empotrados 1, 2, 3 y 4, con un máximo error relativo del 0.008%. En la Tabla 3, se pueden observar la comparación de los valores de esfuerzo axial, el porcentaje de error relativo encontrando es del 0.07%.

Tabla 1. Resultados de desplazamientos MATLAB vs ANSYS

Nodo #	Desplazamientos [in]			% ERROR
	MATLAB	ANSYS		
1	X	-0.0711	-0.0711	0
	Y	0	0	0
	Z	-0.2662	-0.2664	0.07
2	X	0	0	0
	Y	0	0	0
	Z	0	0	0
3	Y	0	0	0
	Z	0	0	0
	X	0	0	0
4	Y	0	0	0
	Z	0	0	0

## 6. CONCLUSIONES

Este documento ha discutido el análisis de estructuras en el espacio 3D, usando el lenguaje de programación de computadora MATLAB y comparando los resultados obtenidos con el programa ANSYS. Se utilizó el método de

elementos finitos para desarrollar el programa. El programa desarrollado se puede aplicar para analizar cualquier estructura con elementos tipo barras en 3D. El programa generado proporciona los desplazamientos, las reacciones en cada nodo directamente y los esfuerzos axiales de cada uno de sus elementos. La comparación entre los resultados encontrados por el programa realizado en MATLAB y el software ANSYS muestra que los valores son aproximadamente consistentes, presentando un porcentaje de error máximo relativo entre ellos del 0.07%. A partir de los resultados, se observa que los desplazamientos, las reacciones en cada nodo y los esfuerzos en los elementos obtenidos a partir de la programación de MATLAB son aceptables. Por lo tanto, todos los resultados analíticos del software MATLAB satisfacen los resultados del software ANSYS. El programa desarrollado con código MATLAB presentado en este documento se puede aplicar a cualquier estructura con elementos tipo barras en tres dimensiones. La interfaz gráfica desarrollada permite realizar con mayor rapidez la configuración geométrica de la estructura que se desea analizar, el bajo costo y el ambiente de trabajo amigable hacen que esta herramienta sea una opción viable para el análisis de estructuras con elementos tipo barras.

**Tabla 2.** Resultados de reacciones MATLAB vs ANSYS

Nodo #	Reacciones [lbf]		
	MATLAB	ANSYS	% ERROR
1	X	0	0
	Y	-223.1632	-223.16 0.001
	Z	0	0
2	X	256.1226	256.11 0.004
	Y	-128.0613	-128.05 0.008
	Z	0	0
3	X	-702.4491	-702.41 0.005
	Y	351.2245	351.21 0.004
	Z	702.4491	702.44 0.001
4	X	446.3264	446.3 0.005
	Y	0	0
	Z	297.5509	297.54 0.003

**Tabla 3.** Resultados de esfuerzos MATLAB vs ANSYS

Conexión Elemento	Esfuerzo Axial [Psi]		
	MATLAB	ANSYS	% ERROR
1-2	-948.19	-948.87	0.07
1-3	1445.36	1446.40	0.07
1-4	-2868.54	-2870.60	0.07

## REFERENCIAS

- [1] Bazyar, M. & Song, C. (2006). Transient analysis of wave propagation in non-homogeneous elastic unbounded domains by using the scaled boundary finite-element method. *Earthquake engineering & structural dynamics* 35(14), 1787-1806.
- [2] Bruns, H., Schuster, C. & Singer, H. (2007). Numerical electromagnetic field analysis for EMC problems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 49(2), 253-262.
- [3] Reddy, J. (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. third edition. New York: McGraw-Hill.
- [4] Lubin, T. et al. (2007). Comparison between finite-element analysis and winding function theory for inductances and torque calculation of a synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Magnetics* 43(8), 3406-3410.
- [5] Buccella, C., Feliziani, M. & Manzi, G. (2007). Three-dimensional FEM approach to model twisted wire pair cables. *IEEE Transactions on Magnetics* 43(4), 1373-1376.
- [6] Ahmad, U. (2013). Development of a Structural analysis program (SABSM) using MATLAB featuring graphical user interfaces. London University.
- [7] Ferreira, J. (2000). *MATLAB Codes for Finite Element Analysis*. Universidade do Porto Portugal.
- [8] Rahami, H. (2010). *Matrix Structural Analysis (MSA)*. Ph.D. Thesis. University of Tehran.
- [9] Barhate, P. & Ladhane, K. (2016). Development of Structural Analysis Program for Truss Structure Using MATLAB. *International Journal for Technological Research in Engineering* 3(9), 2460-2465.
- [10] Logan, D. (2012). *A First Course in the Finite Element Method*. University of Wisconsin.
- [11] Stephen, A. & Lou, Y. (2009). *2D-Truss with GUI Program*. Math Works.



# Recolección de información mediante gamificación y videojuegos que contribuyan al análisis de cómo se resuelven problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos e ingenieros en la industria

Pablo E. Góngora T.<sup>1</sup>

Fernando Martínez R.<sup>2</sup>

Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central  
Bogotá – Colombia

Hemos venido trabajando mediante fases para lograr un estudio completo que permita evaluar cuáles son las condiciones actuales de cómo técnicos, tecnólogos e ingenieros resuelven problemas en las universidades y en la industria que nos conlleven a un planteamiento que permita proponer cambios o mejoramiento en los comportamientos y decisiones frente al amplio desempeño profesional. Claramente nuestro proyecto de investigación “Diseño de una propuesta metodológica para investigación tecnológica que permita a Universidades y a la industria la orientación en la resolución de problemas tecnológicos”, abarca estas fases: 1) Diseño y planeación del proyecto, 2) Elaboración de instrumentos, 3) Pilotaje de instrumentos. Juegos gamificados, 4) Recolección de información, 5) Big Data – análisis de información, y 6) Conclusiones. Estamos en la fase 4 mediante la utilización de los instrumentos integrados en un software que hemos llamado ODIN. A través de este software se realiza la recolección de información de la participación de un número de personas en los juegos. El objetivo es completar 1000 intentos jugados para lograr aplicar la fase 5 y 6. Las fases uno a tres con el título “Gamificación y videojuegos para la resolución de problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos e ingenieros” fue expuesta en el marco de la Conferencia Internacional de Ingeniería Ingenio 2016, agosto 23-25 Medellín, Antioquia-Colombia. La población objeto de estudio son técnicos, tecnólogos e ingenieros tanto de los diversos sectores de la industria y los estudiantes de ingeniería de las universidades.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los instrumentos elaborados compuesto por tres juegos cuyas temáticas son: la abstracción, estudio de casos y juego en lógica por bloques, montados en un subdominio del sitio web del grupo de investigación VIRTUS bajo el nombre de ODIN, permite a los participantes acceder a ellos y jugar. El propósito es que se juegue superando niveles hasta llegar al final en lo posible. Todos los participantes en el amplio campo de sectores de la industria, estudiantes y profesionales de universidades técnicos, tecnólogos e ingenieros pueden participar y lo están haciendo mediante el uso del software desarrollado en ODIN.

Las técnicas de recolección de información existentes como encuestas y entrevistas, se buscan reemplazar por esta nueva técnica, la gamificación, que se combina de manera más práctica y novedosa con los ambientes virtuales y conlleva la información a un manejo práctico de análisis. Este análisis culminará con el diseño de la metodología que se sigue en los sectores industriales para solucionar un problema y permite ampliar las oportunidades de evaluación con los que se pueden analizar en las universidades alternativas de solución a problemas tecnológicos. Se logra acceder a la herramienta virtual en la página : [www.grupovirtus.org](http://www.grupovirtus.org) y en la plataforma dar click en Proyecto ODIN.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 2.1 Planteamiento del problema

Al colocar a disposición el proyecto ODIN hemos encontrado tareas de importante atención para ser utilizado, es una herramienta nueva que no fácilmente se le ha prestado atención y nuestro propósito es no utilizar medios tradicionales como los mencionados anteriormente, entrevistas, encuestas, entre otros, y fortalecer la obtención de resultados que sea de beneficio tanto de los participantes como de los proponentes.

En la actualidad los cambios tecnológicos mantienen un comportamiento acelerado, es un fenómeno exponencial que se está presentando y algo que hemos conocido a través del tiempo pero que debemos enfrentar de manera atenta es la resistencia al cambio. A pesar de los cambios acelerados aún existe este comportamiento. El proyecto puede no ser entendido por quien lo rechaza, la preocupación de nosotros como proponentes lo podemos ver con facilidad de obsolescencia por el comportamiento tecnológico y además la efectividad de los resultados que pueden conducirnos a errores, la garantía de que este nuevo método produzca mejores resultados es una de las tareas que debemos esperar que, aunque no son el objetivo de un proyecto de gestión de conocimiento, representan una herramienta factible para su ejecución. Ante algunas de las participaciones podemos analizar en una muestra de un grupo de jóvenes técnicos y tecnólogos las siguientes apreciaciones al participar en los juegos:

1. “Me ayudaron a poner a prueba mi agilidad mental, la destreza, en conclusión, es un fortalecimiento que cultiva buenas prácticas, que apoyan y cultivan el buen conocimiento”.

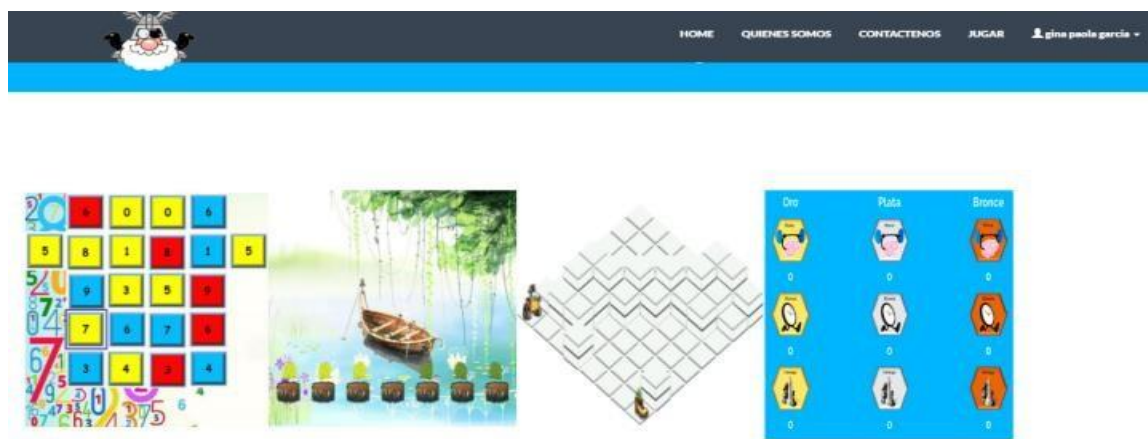
---

<sup>1</sup> [pgongora@itc.edu.co](mailto:pgongora@itc.edu.co)

<sup>2</sup> [fmartinezro@itc.edu.co](mailto:fmartinezro@itc.edu.co)

2. "Se busca poner a prueba el pensamiento y habilidades para desarrollar problemas con agilidad, destreza y estrategia. Lo único que en mi opinión le hace falta a la plataforma sería como una especie de solucionario para ciertos niveles que se sabe que son complicados de pasar, ejemplo el nivel abstracto del pingüino, en donde no lo pude superar y no había una ayuda para poder lograrlo e hizo que no quisiera continuar".
3. "Resaltar que el diseño es un poco crudo y simple que mejoraría mucho usando animación 3D básica y una combinación de colores que sea agradable en la interacción y desarrollo de los niveles".
4. "Una vez ingresado al sistema el juego se hace muy interesante ya que, al no existir explicación ni una guía, el procedimiento experiencia- error resulta ser divertido".
5. Se podría concluir que es una plataforma enriquecedora, convirtiéndose en un proyecto ambicioso que requiere un poco más de inversión".
6. "En mi trabajo pude hablar con muchas personas y les comenté acerca del proyecto, a una gerente de producción le pareció interesante y sugiere que se puede utilizar como un medio telemático para selección de personal que relacionándolo con otros conceptos sicosociales daría como resultado u perfil profesional más acertado debido a que el individuo evaluado no podría manipular las pruebas".
7. "ODIN para mí es un sistema que tiene demasiado potencial a nivel comercial y puede generar una alta rentabilidad tanto para la universidad como para las empresas que evalúen sus prospectos de contratación".
8. "La metodología del proyecto está diseñada para una fácil comprensión de las actividades y solución de las mismas, cuenta con ayudas que ilustran de manera clara las tareas a desarrollar".
9. Muestra De Aplicación de un participante (García, G. 2018):

- *Interfaz inicial.* 3 niveles de juego (cada uno con 3 subniveles) y el significado de las medallas (Figura 1).



**Figura 1.** Interfaz inicial

- *Nivel 1 lógico-matemático.* (Figura 2). Básicamente se trata de mediante lógica matemática completar ciertas operaciones con los números que te dan en un tablero, hasta que los hayas utilizado todos. Cuando terminas un nivel el sistema te muestra cuales fueron tus medallas obtenidas y el nivel aparece en el menú inicial como superado. En mi caso: 1 medalla de plata en eficacia y 2 de bronce en eficiencia y estrategia para el nivel 1 Números (Figura 3).



**Figura 2.** Nivel lógico-matemático

En el nivel 2 y mediante globos de agua se debe llenar un tanque y escribir la respuesta de con cuantos globos de agua se llena el mismo (Figura 4). En mi caso: 3 medallas de bronce en eficacia, eficiencia y estrategia para el segundo nivel.

Lógica Matemática



Figura 3. Nivel 1 (números)

Lógica Matemática



Figura 4. Nivel 2 (cañón)

En el nivel 3 se deben responder ciertas preguntas que pone el juego con respecto al giro de los engranes y responderlas en una casilla (Figura 5). En mi caso: 2 medallas de plata en eficacia y estrategia y una medalla de oro en eficiencia para el tercer nivel.

Lógica Matemática



Figura 5. Nivel 3 (engranajes)

- *Nivel 2: Abstracto.* (Figura 6). En el nivel 1 existen 6 ranas rojas y azules (3 de cada color) y la idea es hacer que las tres ranas de un color pasen al otro lado, intercambiar de lugar con las del color opuesto (Figura 7). En mi caso: 2 medallas de oro en eficacia y eficiencia y una medalla de bronce en estrategia para el primer nivel.



Figura 6. Nivel 2 - Abstracto

Abstracto



Figura 7. Nivel 1 (sapos saltarines)

En el Nivel 2 (camino) hay dos partes: la primera, se trata de observar una secuencia de figuras y determinar cuál es la que encaja en la secuencia o que hace falta y la segunda, con las fichas obtenidas en cada caso formar un camino estilo puzzle. En mi caso: 2 medallas de bronce en eficacia y eficiencia y una medalla de plata en estrategia para el segundo nivel. En lo personal el nivel más difícil.



Figura 8. Nivel 2 (Caminos)

El Nivel 3 (apaga la llama) consiste en llevar un pingüino bombero hasta la ubicación de la llama para que sea apagada (Figura 9). En mi caso: no pude resolver.



Figura 9. Nivel 3 (apaga la llama)

- Nivel 3 – Aplicación (Figura 10). Existen 4 niveles de aplicación que básicamente son de programación y comandos lógicos (Figura 11).



Figura 10. Nivel 3 – Aplicación

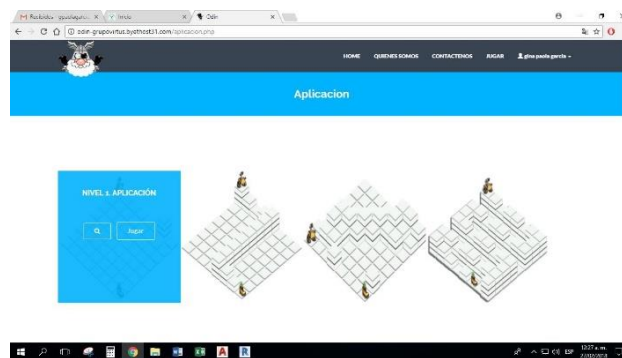


Figura 11. Niveles de aplicación

## 2.2 Formulación del proyecto

Al analizar todas las variables evaluadas en nuestro proceso de investigación tecnológica no encontramos una metodología establecida para solucionar problemas tecnológicos por parte de técnicos, tecnólogos o ingenieros. Existen herramientas importantes que permiten una orientación para asegurar el éxito de los montajes, las aplicaciones y la normalidad de eventos provenientes de una selección, un diseño o una decisión apropiada frente a los múltiples riesgos que pueden surgir. Desde la selección de un proveedor, la selección de un equipo y el procedimiento más apropiado está amparado en herramientas como:

1. Normatividad, siguiendo los parámetros a nivel internacional que se encuentran establecidos. Es el caso de las normas ISO
2. Reglamentación, establecida en cada lugar, sector, región o país que son de obligatorio cumplimiento haciendo posible la seguridad y transparencia de temas específicos.
3. Registros, aplicados al caso de proveedores de productos y servicios que hacen posible establecer la confianza, el respaldo frente a la solicitud de un apoyo técnico.
4. Contrataciones, que permiten establecer los alcances, condiciones de un acuerdo.
5. Todas estas herramientas facilitan claridad frente a situaciones o problemas tecnológicos no deseables pero que de todas formas se presentan.

### 2.3 Justificación del proyecto

La expectativa por encontrar herramientas que faciliten la realización de cualquier actividad y la vertiginosa oportunidad de los cambios de manera acelerada involucra esta alternativa que bien puede considerarse. No hay algo parecido o similar y bueno. Es el momento de plantear soluciones a este caso de la vida diaria en la que se encuentran involucrados los técnicos, tecnólogos e ingenieros. Cada día son más complejos y de gran aplicación los montajes y soluciones en los espacios o ambientes industriales sin límite. Por esto se hace necesario la implementación de recursos, herramientas, metodologías que permitan hacer más eficiente y solucionable una situación a nivel industrial. Es sorprendente como los avances tecnológicos llegan a muchos sectores facilitando, optimizando los procesos pero que también requieren la utilización oportuna de alternativas frente a un problema tecnológico. El reto profesional es complejo y debemos analizar las habilidades, iniciativa y emprendimiento de los profesionales involucrados. La evaluación proveniente de esta herramienta permite seleccionar el personal idóneo en los retos y prácticas diarias que permiten el surgimiento de mejoras e innovación continuas.

### 2.4 Marco teórico y estado del arte

La tendencia actual es el uso de las herramientas virtuales para la solución de problemas, presentación de informes, consignación de tareas, resultados y almacenamiento de información. Dentro de los amplios planteamientos de herramientas para uso en múltiples actividades, resulta atractivo y de mucho interés la aplicación de juegos virtuales en entretenimiento y aplicaciones diversas, pero dentro de todos estos se encuentran los juegos gamificados que permiten su uso en la solución de problemas casi sin darnos cuenta. La sociedad actual está demandando nuevas formas y metodologías de aprendizaje. No podemos permanecer indiferentes y seguir usando las mismas técnicas de evaluación clásicas. En este proyecto se aplica el concepto de gamificación con el objetivo de mejorar las actuales pruebas psicotécnicas, permitiendo al usuario conseguir recompensas y realizar las pruebas al mismo tiempo. Los métodos usuales se convierten en herramientas tradicionales que de manera rutinaria se utilizan y no permiten obtener una percepción real de la evaluación de profesionales y no facilitan tampoco su selección de manera práctica como lo podemos obtener con las herramientas virtuales propuestas.

- *Estado del arte.* A pesar de la existencia de métodos que se enmarcan dentro de herramientas llamados test, en términos generales, que pueden ser en formatos escritos o también en formatos virtuales, estos son monótonos y están divididos en evaluaciones parciales como test de inteligencia, agilidad mental, memorización, concentración y atención, resistencia, trabajo bajo presión, razonamiento que no son muy confiables porque dentro de su estructura se mantienen por tiempo y las respuestas pueden resultar manejables. La propuesta ODIN es una herramienta dinámica, novedosa, podemos decir se aprende jugando, se encuentra totalmente integrada para todos los análisis psicotécnicos, de comportamiento y de conocimiento. Toda la información va siendo almacenada para luego hacer un estudio de información mediante análisis estadístico que nos da una evaluación global integral.

### 2.5 Objetivos

- *General.* Probar el resultado de esta herramienta como elemento novedoso y práctico para evaluar las capacidades de técnicos, tecnólogos e ingenieros en las universidades y la industria.
- *Específicos*
  - Demostrar frente a otros métodos que esta herramienta es muy apropiada para solucionar problemas tecnológicos, es novedosa y de pronta implementación.
  - Analizar y verificar las pruebas obtenidas con los tres tipos de videojuegos utilizados.
  - Difundir la aplicación en universidades y en la industria para la rápida adaptación y aplicación estadística de mejoramiento para el análisis
  - Pilotear los tres videojuegos desarrollados y aplicados con elementos de adaptación, gamificación, retos tecnológicos de difusión, utilización de herramientas estadísticas, para establecer la prueba del diseño propuesto.
  - Promocionar la aplicación en forma masiva en universidades y la industria a nivel nacional e internacional.

- Obtener conclusiones para analizar la forma como se resuelven los problemas de características tecnológicas los técnicos, tecnólogos e ingenieros.
- Optimizar las herramientas de análisis para obtener el mejor provecho de análisis.
- Obtener conclusiones en cuanto al proceso que siguen técnicos, tecnólogos e ingenieros para resolver problemas de características tecnológicas, a través del método inductivo- deductivo.

### 3. MÉTODO

La metodología utilizada para orientar esta investigación es de tipo híbrido, es decir tanto cualitativa como cuantitativa ; es una investigación cuantitativa descriptiva en la medida que describe el estado, las características , factores y procedimientos presentes en la investigación tecnológica y es investigativa cualitativa desde la perspectiva de la investigación acción participación en la medida que se producirá un método que permita orientar las investigaciones tecnológicas en la búsqueda de formalizar la investigación en la industria. De igual forma la investigación será longitudinal en la medida en que la información se tomará en varios instantes de tiempo a lo largo de toda la investigación. La divulgación realizada en la Universidad, en las empresas en los grupos de estudiantes técnicos y tecnólogos permitió la obtención de una muestra representativa para análisis. Para evaluación se tiene en cuenta el tiempo utilizado, el número de intentos y los resultados obtenidos. Con una muestra de 1000 participaciones se obtendrá la evaluación y análisis para conclusiones con flexibilidad de mejoras continuas.

Siguiendo el instructivo dado en los pasos indicados por el proyecto ODIN, inicio, presentación y objetivo, registro como técnico, tecnólogo e ingenieros y menú de juegos se obtiene la información considerando número de intentos, tiempo de duración y cantidad de *click* empleados. La disciplina denominada Minería de Datos estudia métodos y algoritmos que permiten la extracción automática de información sintetizada con el fin de caracterizar las relaciones escondidas en la gran cantidad de datos; también se pretende que la información obtenida posea capacidad predictiva, facilitando el análisis de los datos eficientemente. Bajo la denominación de "minería de datos" se han agrupado recientemente diversas técnicas estadísticas y de aprendizaje automático (Inteligencia Artificial) enfocadas, principalmente, a la visualización, análisis, y modelamiento de información.

La Minería de Datos es una herramienta explorativa y no explicativa. Es decir, explora los datos para sugerir hipótesis. Es incorrecto aceptar dichas hipótesis como explicaciones o relaciones causa-efecto. Es necesario coleccionar nuevos datos y validar las hipótesis generadas ante los nuevos datos, y después descartar aquellas que no son confirmadas por los nuevos datos. Dentro de la herramienta web se almacenan diferentes tipos de datos que pueden brindar información útil si se aplica alguna de las herramientas que ofrece la minería de datos. Para este caso específico se eligió aplicar el algoritmo de clasificación y clusterización K-Means, teniendo en cuenta como tributos de entrada el número de intentos, número de *clicks* que realizó el usuario a lo largo de las pruebas, y el tiempo empleado cuando se realizó la prueba.

### 4. RESULTADOS, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La técnica de análisis *cluster* o análisis de conglomerados consiste en clasificar a los individuos en estudio formando grupos o conglomerados (cluster) de elementos, tales que los individuos dentro de cada conglomerado presenten cierto grado de homogeneidad con base en los valores adoptados sobre un conjunto de variables. Para realizar un análisis a los resultados del algoritmo y la minería de datos existen diferentes herramientas, para este caso lo más conveniente es usar métodos de análisis especializados en algoritmos de clustering. El análisis de clustering intenta identificar grupos de casos relativamente homogéneos basándose en las características seleccionadas y utilizando un algoritmo que puede gestionar un gran número de casos. Sin embargo, el algoritmo requiere que el usuario especifique el número de clústeres. Se pueden especificar los centros iniciales de los clústeres si se conocen de antemano o si se posee la información que describe la posición del centroide. Se puede elegir uno de los dos métodos disponibles para clasificar los casos: la actualización de los centros de los clústeres de forma iterativa o sólo la clasificación. Asimismo, puede guardar la pertenencia a los clústeres, información de la distancia y los centros de los clústeres finales. Adicionalmente, se puede especificar una variable cuyos valores sean utilizados para etiquetar los resultados por casos. También se puede solicitar los estadísticos F de los análisis de varianza, aunque estos estadísticos son oportunistas (ya que el procedimiento trata de formar grupos que de hecho difieran), el tamaño relativo de los estadísticos proporciona información acerca de la contribución de cada variable a la separación de los grupos.

#### ▪ *Análisis de agrupación*

1. Examinar las agrupaciones finales. Se inicia examinando las agrupaciones finales para ver si los conglomerados de la partición final tienen sentido intuitivo, con base en la partición inicial que se especificó. Se debe verificar que el número de observaciones en cada conglomerado satisfaga los objetivos de agrupación. Si un conglomerado contiene muy pocas o demasiadas observaciones, se debería volver a ejecutar el análisis utilizando otra partición inicial.
2. Evaluar la variabilidad dentro de cada conglomerado. Se examina la variabilidad de las observaciones dentro de cada conglomerado utilizando las medidas de distancia desde el centroide. Los conglomerados con valores

más altos muestran una mayor variabilidad de las observaciones dentro del conglomerado. Si la diferencia de la variabilidad entre los conglomerados es demasiado alta, se debería volver a ejecutar el análisis utilizando otra partición inicial.

### **Trayectoria del Grupo de Investigación**

El Grupo de Investigación Virtus desde su participación en Ingenio 2016 en Medellín, ha venido desarrollando una actividad continua en torno a los ambientes virtuales de aprendizaje, aulas virtuales, educación virtual y su complemento con la educación presencial, en educación técnica y tecnológica. La actividad dinámica destaca su ejecución de participación en eventos con ponencias y capacitaciones tanto para profesores como estudiantes. Después de su reconocimiento en 2010 como grupo de investigación reconocido por Colciencias con categoría D, se convierte en grupo interinstitucional con la Universidad Distrital en 2013 y ha venido considerándose como grupo de investigación reconocido por Colciencias en categoría C y continua en esta categoría. Este es un excelente proyecto que permite la participación de técnicos, tecnólogos e ingenieros tanto estudiantes como empresas a nivel industrial.

## REFERENCIAS

- [1] Cegarra, J. (2012). Metodología de la investigación científica y tecnológica. México: ISE.
- [2] García F., Morales, M. & Muñoz, C. (2010). De la investigación científica a la Tecnológica en las organizaciones. UPIICSA 18(7), 3-13.
- [3] Ziman, D. (1996). El conocimiento Tecnológico. El método en la tecnología.
- [4] Hurtado, I. & Toro, J. (2007). Paradigmas y Métodos de investigación en tiempo de cambio. El Nacional.
- [5] Cegarra, J. (2004). Metodología de la investigación científica y Tecnológica. Madrid.
- [6] Ramirez, J. (2014). Gamificación : Mecánica de Juegos en tu vida personal y profesional. Mexico: Alfa Omega.
- [7] Kapp, K. (2012). The Gamification of learning and instruction - Games- based methods and strategies for training and education. Pfeiffer and Wiley Imprint.
- [8] Marin, J. & Hierro, E. (2014) Gamificación. El poder del juego en la gestión empresarial y la conexión con los clientes.
- [9] Revista Dinero (2017). 5000 empresas.
- [10] Krick, E. (1982) Ingeniería de Métodos. Resistencia al cambio, causas comunes y manera de minimizarla. Editorial Limusa
- [11] Beltrán, B. (2010). Minería de datos 2MC, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la computación.
- [12] Scott, F. (2011). El desarrollo de software como ingeniería de software. Universidad de Columbia.
- [13] Janna, A. (2012). Gamification: Experts expect game layers to expand in the future, with positive and negative results.
- [14] Gómez, J., Hidalgo, M. & Guilera, G. (2010). El sesgo de los instrumentos de medición. Papeles del psicólogo 31(1), 75-84.



# Ingeniería de Requisitos para la construcción de software de Realidad Virtual inmersiva RV aplicando el diseño universal

Martha Y. Segura R.<sup>1</sup>

Ricardo A. Fonseca<sup>2</sup>

Juan D. Correa G.<sup>3</sup>

Universitaria Agustiniiana  
Bogotá – Colombia

En este capítulo se presenta la Ingeniería de Requisitos como pieza fundamental en el proceso de construcción de software de realidad virtual inmersiva, accesible e inclusivo, lo cual garantiza la calidad en el proceso de desarrollo, pues asegura que se tengan en cuenta las necesidades de todas las partes interesadas. La Ingeniería de requisitos permite descubrir los requisitos de alto nivel a partir de las necesidades de los usuarios, así como su validación y análisis, para gestionarlos en sucesivos niveles de abstracción. La realidad virtual inmersiva permite experimentar con espacios tridimensionales creando una interacción con todos los sentidos del ser humano. Es a través de los sentidos que el ser humano recibe la información del medio que lo rodea y la envía a las células nerviosas para su procesamiento. La realidad virtual simula mundos o entornos virtuales que permiten al ser humano interactividad e inmersión. La construcción de software de realidad virtual inmersiva debe concebirse a partir un análisis profundo de las múltiples necesidades y deseos de usuarios diversos. La accesibilidad y la inclusión son orientadas por el diseño universal o diseño para todos, se busca diseñar productos o servicios que puedan ser utilizados por el mayor número de personas, teniendo en cuenta la variedad de capacidades funcionales en el ser humano. Se definen siete principios del diseño universal que buscan guiar el diseño de ambientes, productos y comunicaciones, entre ellos el software de realidad virtual. Con la Ingeniería de requisitos se pretende alinear al proceso de desarrollo el diseño universal para lograr que el software de realidad virtual inmersiva sea utilizable, usable y accesible teniendo en cuenta la diversidad humana.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el software se ha transformado, cada vez existen más y mejores herramientas para solucionar diversos problemas, necesidades y deseos de los usuarios, como consecuencia han evolucionado los procesos de diseño y desarrollo. Surgen nuevos dispositivos capaces de canalizar la información que se recibe a través de los sentidos mediante la realidad virtual, que se crea en una multiplicidad de sistemas. Como lo expresa [1] “Un sistema de realidad virtual es una interfaz que implica simulación en tiempo real e interacciones mediante múltiples canales sensoriales. Estos canales sensoriales son los del ser humano: la vista, el oído, el tacto, el olfato y el gusto”

El software de realidad virtual inmersiva no es ajeno a las barreras de accesibilidad, por tal razón se busca atenuar dichas barreras para personas con características, capacidades y medios tecnológicos diferentes. Los usuarios también han evolucionado con la tecnología, son altamente creativos y exigentes en cuanto al diseño, innovación y propósitos del software. Involucrar a los usuarios en el proceso de desarrollo asegura la calidad y el éxito del software. Sin embargo, se demanda incluir requisitos de accesibilidad para personas con diversas capacidades.

Los requisitos se desarrollan en la ingeniería de requisitos que en [2] se define como “el subconjunto de la ingeniería de sistemas que se ocupa de descubrir, desarrollar, rastrear, analizar, calificar, comunicar y gestionar los requisitos que definen el sistema en sucesivos niveles de abstracción”. El diseño universal, “diseño de productos, entornos, programas y servicios para ser utilizable por todas las personas de diferentes edades y habilidades a lo largo del tiempo, en la mayor medida posible, sin la necesidad de adaptación o diseño especializado” [3], propone un diseño para todos. Según el Informe Mundial sobre la discapacidad [4] “Casi siempre que se incorporan nuevas tecnologías, las personas con discapacidad no obtienen el beneficio pleno de ellas”, así mismo resalta, “las personas con discapacidad deberían participar en el diseño, el desarrollo y la puesta en práctica de las TIC”.

La investigación se enfoca en el contexto de la Ingeniería de requisitos para comprender cómo los requisitos de alto nivel –objetivos, metas, aspiraciones, expectativas, necesidades- se transforman en requisitos de bajo nivel [1]. Durante esta etapa se incluyen los siete principios del Diseño Universal, como indica [5] sobre el diseño en mención, “para el que sólo existe una población, que está compuesta por individuos con distintas características y habilidades, y que requieren diseños e intervenciones acordes a esas diversidades”. Según [6] un requisito se define como “una declaración que identifica un producto o proceso operacional, funcional o característica o restricción de diseño, que, de manera inequívoca, comprobable o medible, y necesaria para la aceptación del producto o proceso (por los consumidores o las pautas internas de garantía de calidad)”. El aporte de la Ingeniería de Requisitos en la construcción de software de realidad virtual inmersiva, permite generar un producto de calidad a partir de la correcta identificación de las necesidades, la validación, la verificación y la especificación de requisitos de software.

---

<sup>1</sup> martha.segurar@uniagustiniana.edu.co

<sup>2</sup> ricardo.fonseca@uniagustiniana.edu.co

<sup>3</sup> juan.correag@uniagustiniana.edu.co

## 2. ESTADO DEL ARTE

El artículo *Mejorando los Sistemas Colaborativos y Post-WIMP mediante la Especificación de Requisitos* [7], en España, tiene como objetivo solventar los problemas de la complejidad inherente de la colaboración entre usuarios, así como a la necesidad de consciencia (awareness), mediante el desarrollo de un framework de IR (Ingeniería de Requisitos) capaz de especificar los requisitos de los sistemas colaborativos y Post-WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointer), con especial interés en los requisitos de awareness acerca del contexto del usuario. *Heler: Una herramienta para la ingeniería de requisitos automatizada* [8], en Colombia, es una investigación orientada a la implementación de una herramienta, que ofrece soporte a las actividades de ingeniería de requisitos de la fase de entendimiento del problema del Proceso Unificado. En Argentina desarrollan el artículo [9] *Ingeniería de Requerimientos para Sistemas Sensibles al Contexto, un estudio comparativo*, el cual presenta el estudio de diversos enfoques de Ingeniería de requerimientos para aplicaciones capaces de reaccionar a los cambios en el contexto de manera automática.

*ISRE: Immersive Scenario-based Requirements Engineering with virtual prototypes* [10], en el Reino Unido, presentan el método de Ingeniería de Requisitos Inmersivos basado en Escenarios, para guiar el análisis de problemas encontrados durante la prueba de prototipos virtuales, y ayuda a asignar causas a defectos de requisitos genuinos a problemas de usabilidad con la tecnología de realidad virtual. El método se describe y su uso se ilustra con un estudio de caso de validación de requisitos para una aplicación de mantenimiento de aeronaves.

En Colombia, el trabajo de grado *Ingeniería de Requisitos para Contenidos Interactivos con Realidad Aumentada* de [11], expone un modelo de entrevista que permite especificar requisitos y así obtener la información adecuada para establecer de forma clara las condiciones que los usuarios finales requieren. Adicionalmente, se realizó una verificación y validación del modelo, realizando un contenido de realidad aumentada en el cual se obtienen todas las especificaciones a partir de unas historias de usuario. El artículo [12], *Experiencia Inmersiva utilizando mundos virtuales en la Ingeniería de Sistemas de Información*, describe la experiencia inmersiva a través de un mundo virtual con objetos lúdicos en una clase de la materia Sistemas y Organizaciones de la carrera de Ingeniería de Sistemas de Información de la Universidad Tecnológica Nacional de Tucumán, en Argentina.

*Requirements Elicitation and Prototyping of a Fully Immersive Virtual Reality Gaming System for Upper Limb Stroke Rehabilitation in Saudi Arabia*, es un artículo en el cual presentan los requisitos que se derivan de un sistema de rehabilitación basado en realidad virtual inmersiva que se diseñará para los pacientes internos con derrame cerebral en miembros superiores; también proporcionan un prototipo conceptual inicial del sistema propuesto [13]. En Colombia, el artículo titulado *Aplicación de la Realidad Virtual en la rehabilitación cognitiva* [14], presenta como objetivo sustituir un juego de mesa utilizando el mismo tipo de juego simulado en un entorno de realidad virtual con el fin de mejorar y ampliar el proceso de la rehabilitación cognitiva.

Realizado el recorrido por los trabajos previos relacionados con el dominio de la presente investigación se permite identificar el creciente desarrollo de la aplicación de la realidad virtual en diferentes entornos y sistemas; el uso de la ingeniería de requisitos para asegurar la calidad en procesos y productos de software, y la satisfacción del usuario. Así mismo, se evidencia como el diseño universal juega un papel importante en la creación de software accesible. Se observan algunos trabajos relacionados con los temas citados y el propósito de esta investigación, pero no la integración de la ingeniería de requisitos, la realidad virtual inmersiva y el diseño universal.

## 3. INGENIERÍA DE REQUISITOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE SOFTWARE DE REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA APLICANDO EL DISEÑO UNIVERSAL

### 3.1 Sistema de Realidad Virtual Inmersiva

La Realidad Virtual es un sistema compuesto por componentes de hardware, software, comunicaciones y recurso humano, como sistema se integran sus componentes para crear mundos posibles, mostrar procesos industriales, recrear escenas, experimentar situaciones, entre otros. En este sentido, un sistema de realidad virtual inmersiva busca que el usuario pierda contacto con la realidad al percibir de manera exclusiva los estímulos del mundo virtual, según [15]. Sin embargo, la inmersión lograda hasta ahora en los sistemas de realidad virtual se restringe sólo a la inmersión espacial, es decir, la percepción de estar físicamente presente en un mundo virtual, por [16].

En [17] la integración de las interfaces naturales de usuario, como el tacto, el habla, los gestos, la escritura a mano y la visión con los entornos de realidad virtual 3D posibilitan al usuario interactuar con los objetos virtuales de forma muy similar a como lo haría con los objetos reales. En la Figura 1 se observa la integración de los componentes del sistema de Realidad virtual inmersiva [15]; equipo de visualización, equipo de adquisición, sistemas de comunicación, accesorios, hardware y software. Los componentes son cada vez más innovadores, alineados a estos se encuentran los usuarios, los diseñadores gráficos y 3D, los desarrolladores de software, programadores, analistas, modeladores y los ingenieros.

Actualmente en los equipos de visualización se destacan cascos, pantallas y gafas; en los equipos de adquisición se destacan las videocámaras y smartphone, que han desplazado otro tipo de dispositivos; los accesorios constituidos por sistemas de audio y sensores; el hardware ha evolucionado hacia las tarjetas aceleradoras gráficas, y procesadores

cada vez más veloces; los sistemas de comunicación como Wifi, HDMI, USB permiten la interacción no sólo con uno, sino con muchos usuarios simultáneamente; y el software cada vez más sofisticado se ha fortalecido en modelación y reproducción, es de resaltar como ejemplo el software Unity 3D que permite realizar la construcción de videojuegos y aplicaciones de realidad virtual. El software o aplicación de realidad virtual inmersiva se constituye como un Subsistema que hace parte o está contenido dentro del Sistema de Realidad Virtual, con sus respectivos componentes.



Figura 1. Convergencia de componentes del sistema de Realidad Virtual Inmersiva [15]

### 3.2 Proceso de desarrollo de un sistema a partir de la Ingeniería de requisitos

El Proceso de desarrollo de un sistema [1] se organiza en dos partes, el Dominio del Problema y el Dominio de la Solución, inicia con el proceso Desarrollar los requisitos de las Partes interesadas a partir de la Declaración de necesidades y finaliza con el proceso Desarrollar el Diseño del Subsistema definiendo los Requisitos de nivel bajo del Subsistema, como se puede observar en la Figura 2, en la cual los círculos representan procesos y los rectángulos datos o información que es leída o producida.

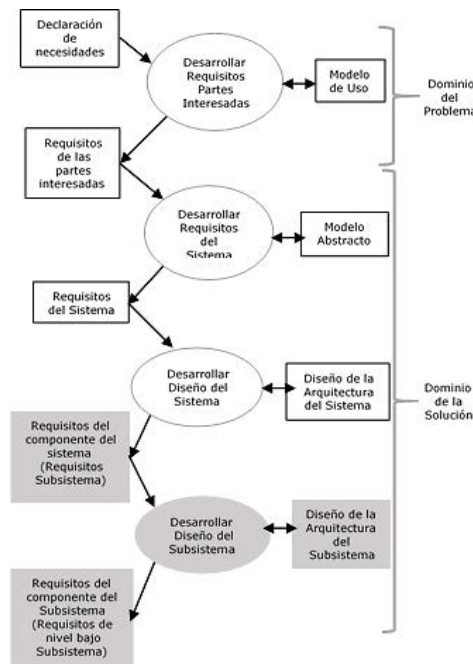


Figura 2. Proceso de desarrollo de un sistema [1]

La Ingeniería de Requisitos [15] permite identificar notoriamente la necesidad de un sistema que contribuya a experimentar la realidad virtual inmersiva de manera conjunta con una interfaz natural de usuario.

### 3.3 Proceso de construcción de software de realidad virtual inmersiva aplicando el diseño universal

- **Dominio del Problema.** Se inicia el proceso para el desarrollo de software de realidad virtual inmersiva definiendo el Dominio del problema, la Accesibilidad y la Inclusión, para el mayor número de personas incluyendo las personas que presenten algún tipo de discapacidad. Se Declaran las necesidades, para lo cual se toman los siete principios del diseño universal [18] que se definen como insumo para Desarrollar los requisitos de las partes interesadas. El software debe asegurar ser accesible al mayor número de personas:
  - Principio No. 1. Uso equiparable. El diseño es útil y vendible a personas con diversas capacidades. El software debe asegurar ser accesible para el mayor número de personas, indistintamente de sus capacidades.
  - Principio No. 2. Uso flexible. El diseño se acomoda a un amplio rango de preferencias y habilidades individuales. El software debe presentar diferentes opciones de configuración para las personas con diversas capacidades.
  - Principio No. 3. Simple e intuitivo. El diseño es fácil de entender, atendiendo a la experiencia, conocimientos, habilidades lingüísticas o grado de concentración actual del usuario. El software debe ser amigable y sencillo de usar para la audiencia en general.

- Principio No. 4. Información perceptible. El diseño comunica de manera eficaz la información necesaria para el usuario, atendiendo a las condiciones ambientales o a las capacidades sensoriales del usuario. El software debe proporcionar información que usuarios con diversas capacidades sean capaces de entender.
- Principio No. 5. Con tolerancia al error. El diseño minimiza los riesgos y las consecuencias adversas de acciones involuntarias o accidentales. El software debe proporcionar sistemas de ayuda o asistencia para evitar errores en su uso.
- Principio No. 6. Que exija poco esfuerzo físico. El diseño puede ser usado eficaz y confortablemente y con un mínimo de fatiga. El software no debe generar ningún tipo de inconveniente por su uso.
- Principio No. 7. Tamaño y espacio para el acceso y uso. Que proporcione un tamaño y espacio apropiado para el acceso, alcance, manipulación y uso, atendiendo al cuerpo, la postura o la movilidad del usuario. El software debe asegurar que sea utilizado en dispositivos de hardware que se adapten a los diferentes usuarios.

A partir de este momento se piensa en una solución potencial que abarque los principios del diseño universal para software de realidad virtual inmersiva. En la Figura 3 se presenta el Modelo de Uso para el Dominio del Problema en la construcción de software de realidad virtual inmersiva.

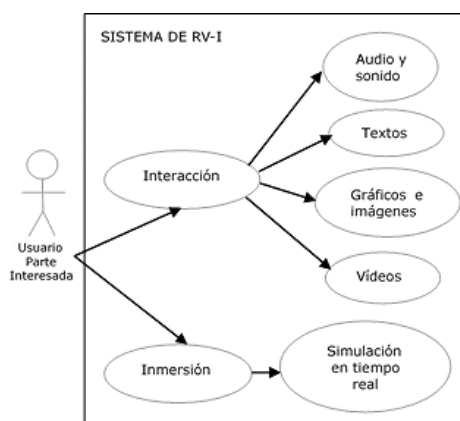


Figura 3. Modelo de Uso de un sistema de realidad virtual inmersiva

- *Dominio de la Solución.* A partir de los principios de diseño universal que determina un sistema útil, flexible, intuitivo, simple, perceptible, con baja tasa de errores y usable, se inicia el proceso de Desarrollar los requisitos de las partes interesadas. Este proceso produce los Requisitos de las partes interesadas, teniendo en cuenta la información y la comunicación para la Accesibilidad, se determina que se deben asociar las discapacidades de origen visual y de origen auditivo.

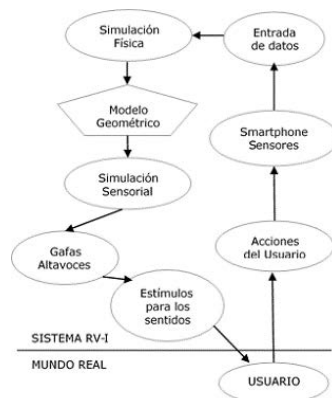
Para Desarrollar los Requisitos de las partes interesadas se hace necesario priorizar la información que se quiere presentar en el software de realidad virtual inmersiva, consolidando los Requisitos. Se toma como base el documento de Medidas de Accesibilidad e Inclusión para personas con discapacidad [19] del gobierno de Chile. Dentro de las partes interesadas se incluyen las personas con discapacidad de origen visual, personas ciegas y con baja visión, para los cuales se presentan los requisitos:

- Información audible que no genere molestias por exceso de sonidos, incorporando señales de aviso para captar la atención del usuario.
- Audio descripción, en el cual se van describiendo imágenes que se presentan en la actividad u otra información de importancia.
- Servicio de transcripción de voz, que permite leer en una pantalla la información que se está entregando en formato audible.
- Para las personas con baja visión, debe tenerse en cuenta evitar la alta refracción lumínica, en lo posible que no produzca reflejos.
- En los formatos visuales debe existir contraste entre el color de la letra y el fondo, considerando el tamaño de la fuente, evitar fuentes complejas y con adornos.
- Los esquemas y dibujos deben ser realizados con trazos sencillos y gruesos, con poco detalle y sobre un fondo sin imágenes.
- Los gráficos deben contar también con una descripción fiel al contenido que entregan de forma visual.
- Se sugiere el uso de frases cortas y simples, el uso de símbolos simples e intuitivos que sean de fácil comprensión.
- La información o contenido debe ser sintético, conceptos clave destacados y diferenciados, evitar el uso de cursivas en textos largos, emplear lenguaje claro, conciso y directo.
- Para personas con discapacidad visual severa o total, es una alternativa generar información en formatos audibles de calidad.

Así mismo, se incluyen las personas con discapacidad de origen auditivo, para los cuales los requisitos son:

- Sistema de subtítulos Ocultos o Closed Caption (CC), ofrecen además de los cuadros de diálogos, efectos sonoros, onomatopeyas (ruidos como timbres, truenos, llantos, gritos, disparos, que no necesariamente se ven en la pantalla).
- Una transcripción a texto del contenido que se entrega mediante audio.
- Se sugiere realizar un vídeo que incorpore la interpretación de la lengua de señas, el intérprete de señas debe aparecer en primer plano.
- Para personas que presentan baja audición, contar con un servicio de transcripción a texto de lo que se va relatando en la actividad.

La arquitectura del Sistema de Realidad Virtual Inmersiva RV-I que define sus componentes y las acciones del usuario se presenta a continuación en la Figura 4.



**Figura 4.** Modelo de Arquitectura del Sistema de Realidad Virtual Inmersiva RV-I

A partir de los componentes del sistema se presentan los requisitos y restricciones que debe cumplir el sistema y subsistema (software) de realidad virtual inmersiva. En la Tabla 1 se muestran los requisitos (RF#) y restricciones (RNF#) priorizados para la construcción del software de realidad virtual inmersiva.

**Tabla 1.** Requisitos y restricciones del Sistema y Subsistema (Software) de RV-I

Req.	Descripción	Tipo	Prioridad
RF1	El sistema debe ser capaz de presentar información que sea percibida por los sentidos de visión y audición.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF2	El sistema contará con la opción de cambiar el tamaño de los textos.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF3	El sistema permitirá que el usuario cambie el contraste de colores.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF4	El sistema presentará imágenes con atributo textual.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF5	El sistema permitirá que el usuario pueda activar el lenguaje de señas o el sistema Closed Caption.	Requisito	( ) Esencial ( ) Deseado (X) Opcional
RF6	El sistema permitirá a los usuarios leer y usar el contenido con el tiempo suficiente.	Requisito	( ) Esencial ( ) Deseado (X) Opcional
RF7	El diseño del contenido no debe causar mareos o espasmos.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF8	El sistema permitirá al usuario saber hacia dónde va.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF9	El contenido de los textos debe ser legible y comprensible para cualquier usuario.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF10	El sistema permitirá que el usuario no cambie de contexto sin informarle.	Requisito	( ) Esencial (X) Deseado ( ) Opcional
RF11	El sistema informará previamente las instrucciones mediante texto o audios para evitar errores.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RF12	El sistema contará con un servicio de transcripción de texto.	Requisito	( ) Esencial ( ) Deseado (X) Opcional
RF13	El sistema presentará un menú textual e icónico para que el usuario personalice su experiencia.	Requisito	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF1	El sistema no presentará información para ser captada por los sentidos del gusto, olfato y tacto.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF2	El sistema será multiplataforma y multilinguaje.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF3	El sistema podrá ser utilizado en los sistemas operativos Windows, Android y IOS.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF4	El tiempo de aprendizaje del sistema por un usuario no será de más de una (1) hora.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF5	La tasa de errores generados por el usuario debe ser menor del 1%.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF6	El sistema debe contar con manuales de usuario.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF7	El sistema debe proporcionar mensajes de error informativo y orientado al tipo de usuario.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF8	El sistema debe contar con un módulo de ayuda en línea.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF9	El sistema será desarrollado para las plataformas PC Web y Móvil.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF10	El sistema será desarrollado en el motor de videojuego multiplataforma Unity 3D.	Restricción	(X) Esencial ( ) Deseado ( ) Opcional
RNF11	El sistema deberá consumir como mínimo 1 GB de memoria RAM y tener compatibilidad con giroscopio.	Restricción	( ) Esencial ( ) Deseado (X) Opcional

El software de realidad virtual inmersiva debe cumplir con los requisitos y restricciones para asegurar la accesibilidad e inclusión de un gran número de personas, logrando una satisfacción total en su experiencia virtual.

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se construyó un prototipo de software de realidad virtual inmersiva, que consiste en un Tour virtual por las sedes de una Institución de Educación Superior, que permite la visualización de imágenes en 360°, entornos y objetos 3D. Para la realización del prototipo se utilizó una metodología de desarrollo ágil que se aplicó en las etapas del ciclo de desarrollo del software.

El prototipo generado basado en la plataforma móvil para sistemas Android (KitKat 4.4.1 o superior, con disponibilidad de giroscopio) es multiplataforma (web, móvil, escritorio) y multilinguaje (inglés, español), cuenta con audios y sonidos que ambientan el recorrido, subtítulos o Closed Caption e interactividad con los elementos del tour. Los dispositivos móviles aptos para el uso del software deben contar con al menos 1GB de memoria RAM, sistema operativo Android igual o superior a KitKat y compatibilidad con giroscopio. En la Figura 5 se puede observar el menú intuitivo de navegación del Tour de realidad virtual inmersiva y un laboratorio en 3D.

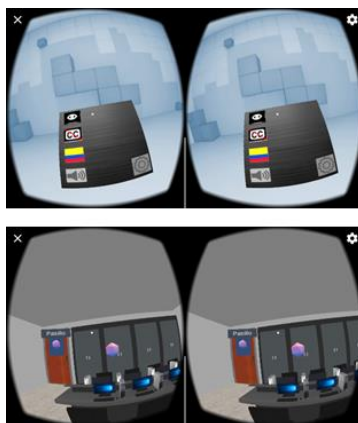


Figura 5. Archivos fotográficos del software de realidad virtual inmersiva

Se realizó test de usabilidad mediante un cuestionario en línea con varios usuarios, edades entre 12 y 86 años, incluidas personas con discapacidad de origen visual y auditivo para determinar su experiencia en el software de realidad virtual. La prueba consistía en navegar por la aplicación web y móvil (usando gafas de realidad virtual) y posteriormente contestar el test para determinar su grado de satisfacción frente al software. Los resultados del test determinaron que la experiencia de los usuarios frente al software fue buena, el software presentado les resultó intuitivo, fácil de usar y flexible. A partir de los resultados de las pruebas se hacen ajustes de acuerdo a la percepción de la información recibida por parte de los usuarios.

#### 5. CONCLUSIONES

La Ingeniería de requisitos valida las necesidades de los usuarios interesados en el sistema, descubre los requisitos de alto nivel y de bajo nivel para asegurar que el producto diseñado cumpla con las expectativas reales de los usuarios. El proceso de transformar la declaración de las necesidades de las partes interesadas en requisitos del sistema y subsistema, permite definir el diseño del sistema. El diseño universal es el mecanismo que asegura la accesibilidad al software de realidad virtual inmersiva y a software de todo tipo.

El prototipo diseñado desplegó aspectos que se anticipan al desarrollo de un producto innovador de realidad virtual inmersiva que cumpla con los principios del diseño universal. Las herramientas utilizadas en la construcción del prototipo proveen una interfaz de desarrollo para ambientes web, móvil y PC. Unity garantiza que, con unas modificaciones, se pueda exportar el proyecto tanto a computadoras con sistemas operativos Windows, Linux y Mac conservando los mismos escenarios y modificando la programación de los eventos (interacción); para exportar a Web (Webgl), se usa el mismo proyecto para las plataformas de PC.

Como trabajo futuro se propone plantear o adaptar una metodología de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual que cumpla con los principios del diseño universal, y aplicarla a la construcción de un software de realidad virtual inmersiva. Posteriormente se busca realizar Pruebas A/B con el prototipo y el software final producto de la investigación y determinar el aporte de la metodología propuesta.

## REFERENCIAS

- [1] Burdea, G. & Coiffet, P. (1996). *Tecnologías de la realidad virtual*. Barcelona.
- [2] Dick, J., Hull, E. & Jackson, K. (2017). *Requirements Engineering*. Suiza: Springer.
- [3] UN (2006). *Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad*. Nueva York.
- [4] OMS (2011). *Informe Mundial sobre discapacidad*. Suiza.
- [5] Alonso, F. (2007). Algo más que suprimir barreras: Conceptos y argumentos para una accesibilidad universal. *Trans. Revista de traductología* 11, 15-30.
- [6] IEEE (2018). 1220-1998 - IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process.
- [7] Teruel, M., González, P. & Navarro, E. (2014). *Mejorando los Sistemas Colaborativos y Post-WIMP mediante la Especificación de Requisitos*. Ph.D. dissertation, Universidad de Castilla, España.
- [8] Callejas, M., Castillo, L. & Fernández, R. (2010). Heler: Una herramienta para la ingeniería de requisitos automatizada. *Entramado* 6(2), 184-200.
- [9] Castelli, V., Thomas, P. & Bertone, R. (2017). Ingeniería de Requerimientos para Sistemas Sensibles al Contexto, un estudio comparativo. En XIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- [10] Sutcliffe, A., Gault, B. & Maiden, N. (2004). ISRE: immersive scenario-based requirements engineering with virtual prototypes. *Requirements Engineering* 10(2), 95-111.
- [11] Morales, P. & Araque, D. (2018). *Ingeniería de Requisitos para Contenidos Interactivos con Realidad Aumentada*. Universidad de San Buenaventura Cali.
- [12] Hadad, R. et al. (2017). Experiencia inmersiva utilizando Mundos Virtuales en la Ingeniería en Sistemas de Información. En VII Congreso Virtual Iberoamericano de calidad en Educación Virtual y a Distancia.
- [13] AlMousa, M., Al-Khalifa, A. & AlSobayel, H. (2017). Requirements Elicitation and Prototyping of a Fully Immersive Virtual Reality Gaming System for Upper Limb Stroke Rehabilitation in Saudi Arabia. *Mobile Information Systems* 2017, 1-12.
- [14] Mora, M. (2013). Aplicación de realidad virtual en la rehabilitación cognitiva. *Vínculos* 10(1), 130-135.
- [15] Cantón, D. et al. (2017). Uso didáctico de la realidad virtual inmersiva con interacción natural de usuario enfocada a la inspección de aerogeneradores. *Apertura* 9(2), 8-23.
- [16] Freina, F. & Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. En Conference of eLearning and Software for Education.
- [17] Kaushik, M. & Jain, R. (2014). Natural user interfaces: Trend in virtual interaction. *International Journal of Latest technology in Engineering, International journal of Latest technology in Engineering, Management & Applied Science* 3(4), 141-143.
- [18] Connell, B. et al. (1997). *The Principles of universal design*. Carolina del Norte: Nort Caroline State University.
- [19] Senadis (sf). *Medidas de Accesibilidad e Inclusión para personas con discapacidad*. Ministerio de Desarrollo Social, Chile.

# Propuesta de indicadores para medir el estado de la calidad interna de las aplicaciones de escritorio, desarrolladas como proyectos de grado en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica aplicando la norma ISO/IEC 25000

Katerine Beleño C.<sup>1</sup>

Ronald Palencia<sup>2</sup>

Miguel A. Rincón P.<sup>3</sup>

Universidad Popular del Cesar  
Aguachica – Colombia

En la actualidad el programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica tiene como estrategia de extensión el desarrollo de proyectos de implementación de software en las empresas de la región, debido a esto considera que dichas herramientas deben tener ciertas características de calidad. Se han venido realizando estudios sobre medición de software para establecer una propuesta que apoye la entrega de productos software de calidad a dichas empresas. Esta investigación tiene como meta validar unos indicadores que puedan ayudar a la medición de las características de calidad de cualquier tipo de desarrollo realizado como proyecto de grado del área de software tomando como caso estudio las aplicaciones de escritorio y el uso de la norma ISO 25000.

## 1. INTRODUCCIÓN

La preocupación de académicos y empresarios del campo de la ingeniería del software en agregarle calidad tanto al proceso como al producto software existe desde que se vienen presentando fallos en las entregas de los mismos. Cada fase es esencial dentro del desarrollo de software, la exigencia de calidad en todo el proceso redundando en el mejoramiento del desarrollo del código y en la disminución del esfuerzo realizado para realizar el mantenimiento. El Programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica viene desarrollando aplicaciones como proyectos de grado o proyectos de investigación; éstos son entregadas para uso y por necesidades específicas de las empresas de la región, por ende, se espera que la calidad de los productos sea la mejor pues existe una Institución de índole académica respondiendo por el buen desarrollo de las mismas.

La Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica, viene formando estudiantes en el campo de la ingeniería de sistemas desde hace más de trece años; algunos productos de software entregados como proyectos de grado a empresas de la comunidad no se encuentran en uso debido a algunas fallas en la funcionalidad de los mismos. Esta situación trae mucha preocupación a la comunidad académica de la Institución. Una de las medidas en las que ha pensado el programa es en estandarizar los requisitos que deben poseer los productos de software entregados como proyectos de grado por parte de los estudiantes de Ingeniería de Sistemas y se han dado pasos a través de proyectos como métricas de software en la fase de diseño, medición de la calidad del sistema para el manejo del aprendizaje de la Institución, propuesta metodológica para guiar el proceso de desarrollo de software en los proyectos, entre otras.

En la actualidad no se conoce el estado de la calidad de los desarrollos de software de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica y es importante tener éstas mediciones para poder realizar las mejoras que se requieran y así entregar un producto con estándares de calidad que permita hacerlos competentes y que los desarrolladores tengan un conocimiento de lo que la industria del software propone como excelentes entregas de aplicaciones. A partir de éste acercamiento se podrá más adelante hacer mejoras en los desarrollos futuros y de igual forma se podrá fortalecer la investigación hacia esta rama de la ingeniería del software que ha sido poco explorada hasta ahora.

El hecho de pensar en la aplicación de métricas a los productos desarrollados en la Institución podrá servir a las autoridades académicas para tomar decisiones en lo relacionado con los resultados en lo referente a la calidad de los proyectos de grado de los estudiantes del programa de ingeniería de sistemas. Permitiéndole así mejorar en el área de calidad del producto software. Una de las primeras mediciones que se pretende realizar para luego continuar con otro tipo de software es en las aplicaciones de escritorio, aunque no son las más usadas hoy en día no se puede desconocer que hay casos en los que son necesarias, por ello se inicia con ésta categoría de aplicaciones de escritorio para luego continuar con la web y las relacionadas con dispositivos móviles. Para ello se van a poner a prueba unos indicadores que habían sido propuestos en una investigación anterior y se ha tomado como caso estudio esta medición; la propuesta es que dichos indicadores queden como mecanismos de medición para cualquier característica sin importar el estándar que se termine usando ni el tipo de desarrollo, toda la investigación se centrará más que en la aplicación del estándar es en la puesta a prueba de los indicadores.

## 2. CALIDAD DEL SOFTWARE

La Real Academia de la Lengua Española, define calidad como “la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor”. Estas propiedades permiten conocer en qué estado están las características de

---

<sup>1</sup> [katerinebeleno@unicesar.edu.co](mailto:katerinebeleno@unicesar.edu.co)

<sup>2</sup> [ronaldpalenciaz@hotmail.com](mailto:ronaldpalenciaz@hotmail.com)

<sup>3</sup> [miguelrincon@unicesar.edu.co](mailto:miguelrincon@unicesar.edu.co)



ése algo una vez sea medido. En el caso del software estas propiedades son características intrínsecas al mismo y que también pueden y deben medirse. Pressman define la calidad del software como “concordancia del software producido con los requisitos específicamente establecidos, con los estándares de desarrollo expresamente fijados y con los requisitos implícitos, no establecidos formalmente, que desea el usuario” [1]. Según la IEEE, Std. 610-1990, “es el grado con el que un sistema, componente o proceso cumple los requerimientos especificados y las necesidades o expectativas del cliente o usuario”

Entre las instituciones a nivel internacional que primero se preocuparon por el tema de la calidad en el software tenemos el SEI (Software Engineering Institute), creado por el departamento de defensa de los Estados Unidos quien veía necesario el establecimiento de métricas para los contratistas de la rama. Como respuesta al tema de la estandarización de procesos en el desarrollo de software la ISO crea su apartado de calidad para los mismos creando la ISO9001:1994 que fue una respuesta al modelo CMM (CapabilityMaturityModel) del SEI.

Con respecto a la medición del software es bueno tener claro los siguientes términos:

## 2.1 Medición

Al hablar de calidad del software debemos pensar en la medición y es bueno tener claro que una de las razones principales del incremento masivo en el interés en la medición del mismo ha sido la percepción de que las métricas son necesarias para la mejora de la calidad del proceso [2]. Fenton y Pfleeger [3] definen la medición como: “el proceso de asignar números o símbolos a los atributos de las entidades del mundo real de forma que se puedan describir de acuerdo a unas reglas claramente definidas”. La métrica tomada como una forma de medición del software y cuya definición está dada en la norma técnica ISO/IEC 14598-1, como el método de medición y la escala de medición, será la definición que se tomará de la misma en esta investigación. La unidad de medición es “una cantidad particular, definida y adoptada por convención, con la que se puede comparar otras cantidades de la misma clase para expresar sus magnitudes respecto a esa cantidad particular”.

## 2.2 Métrica

Según Fenton [3] “la métrica es la correspondencia de un dominio empírico (mundo real) a un mundo formal (matemático). La medida incluye al valor numérico o nominal asignado al atributo de un ente por medio de dicha correspondencia”. El objetivo principal de una métrica es valorar y estimar, se habla de valorar en el sentido de magnitudes tales como la calidad, la fiabilidad y la productividad. Y en cuanto a la estimación se tiene en cuenta características tales como el tiempo y el esfuerzo. Los indicadores son medidas derivadas de otras medidas utilizando un modelo de análisis como forma de medir, ésta será la definición formal de indicadores que ha sido tomada del libro de Piattini [4]. La escala en las métricas se conceptúa como un conjunto de valores con propiedades definidas (ISO 14598-1), las escalas se clasifican así: nominal, ordinal, intervalo, proporción, absoluta; cada una define la forma como se realizan las transformaciones admisibles para ellas, el tipo de operaciones matemáticas y los análisis estadísticos que pueden aplicarse sobre el conjunto de valores de la escala. El tipo de escala indica la naturaleza de la relación entre los valores de la escala. Según Piattini [4] se destacan estos cinco tipos principales de escalas:

- *Escala Nominal.* Esta escala sitúa las entidades en clases o categorías asignando al atributo un nombre.
- *Escala Ordinal.* Los atributos son ordenados en rangos, sin embargo, la distancia entre ellos no es significativa. Un ejemplo de este tipo de escalas en una encuesta puede ser: “0” totalmente en desacuerdo, “1” en desacuerdo, “2” de acuerdo, 3 “totalmente de acuerdo”. La distancia entre un rango y otro no es necesariamente igual; es decir la distancia entre 0-1 no necesariamente es la misma que entre 2-3.
- *Escala Intervalo.* Es igual que la escala ordinal, sólo que cuando medimos los atributos a través de esta escala la distancia si tiene sentido.
- *Escala Ratio.* Esta escala tiene en cuenta el orden, el tamaño de los intervalos y también los ratios entre las entidades. El punto fijo de referencia es el cero y se debe incrementar en pasos iguales. Es la escala más útil en la medición de software.
- *Escala absoluta.* Que es la más restrictiva de todas y es utilizada únicamente cuando sólo hay una forma posible de medir un atributo: contado.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta el resumen de propiedades de las escalas según criterios definidos por Maxwell [5].

**Tabla 1.** Tipos de escala de métricas y sus propiedades [5]

Tipo de Escala	¿Hay un orden significativo?	¿Tienen significado las mismas distancias entre valores?	¿El cálculo de ratios tiene sentido?
Nominal	No	No	No
Ordinal	Sí	No	No
Intervalo	Sí	Aproximadamente	No
Quasi-Intervalo	Sí	Sí	No
Ratio	Sí	Sí	Sí
Absoluta	Sí	Sí	Sí

## 2.3 Unidad de medición

La unidad de medición es una cantidad particular, definida y adoptada por convención, con la que se puede comparar otras cantidades de la misma clase para expresar sus magnitudes respecto a esa cantidad particular. En lo referente a las formas de medir, se define como la secuencia lógica de operaciones descritas de forma genérica, usadas para realizar mediciones de un atributo respecto de una escala específica. También se encuentran medidas derivadas que se calculan a partir de las medidas base. Al final la medición se trata de obtener información que satisfaga una necesidad detectada por una empresa en la que se lleva a cabo el software. Luego de tener clara las necesidades se establecen los atributos objetos de medición y se definen las métricas necesarias. Las métricas no pueden interpretar por sí solas un concepto medible, es de allí que viene el concepto de indicadores.

## 2.4 Indicador

El método de cálculo y la escala definidos, además del modelo y criterios de decisión con el fin de proveer una evaluación o estimación de un concepto medible con respecto a una necesidad de información. [6]

## 3. NORMA ISO 25000

Presentada en el 2005 la ISO/IEC se basa en una combinación de la ISO 9126 y en ISO 14598 (Evaluación del software). Este conjunto de normas deriva su nombre de Software Quality Requirements and Evaluation y tiene como objetivo fundamental guiar el desarrollo de los productos de software con la especificación y evaluación de requisitos de calidad. La ISO/IEC 25000 se centra más en el producto de software, es una mejora respecto a la 9126 presentando algunos cambios en las características y sub características de calidad interna/externa y de calidad en uso de la misma. La ISO 25000 se divide en:

- ISO/IEC 2500n – División de Gestión de Calidad [4]. Las normas que forman este apartado definen todos los modelos, términos y definiciones comunes referenciados por todas las otras normas de la serie SQUARE.
- ISO/IEC 2501n – División de Modelo de Calidad [4]. La norma de este apartado presenta un modelo de calidad detallada incluyendo características para calidad interna, externa y en uso.
- ISO/IEC 2502n – División de Medición de Calidad [4]. Estas normas incluyen un modelo de referencia de la medición de la calidad del producto, definiciones de medidas de calidad (interna, externa y en uso) y guías prácticas para su aplicación.
- ISO/IEC 2503n – División de Requisitos de Calidad [4]. Estas normas ayudan a especificar requisitos de calidad que pueden ser utilizados en el proceso de elicitación de requisitos de calidad del producto software a desarrollar o como entrada del proceso de evaluación.
- ISO/IEC 2504n – División de Evaluación de Calidad [4]. Este apartado incluye normas que proporcionan requisitos, recomendaciones y guías para la evaluación de productos software.

De estas divisiones ampliaremos la que tiene relación con el modelo de calidad el 2501n, se establecerán las características y sub características que se desarrollan en la ISO 25010 que presenta algunas modificaciones respecto a la 9126 (Tabla 2).

**Tabla 2.** Modelo de Calidad del Producto Norma ISO/IEC 25010 [7]

	<b>Característica</b>	<b>Sub-característica</b>
Calidad externa e interna	Funcionalidad	Complejidad, Corrección, Idoneidad
	Rendimiento	Comportamiento en el tiempo, Utilización de recursos, Capacidad
	Compatibilidad	Coexistencia, Interoperabilidad
	Usabilidad	Inteligibilidad, Aprendizaje, Operabilidad, Protección a errores de usuario, Atractividad, Accesibilidad
	Confiabilidad	Madurez, Disponibilidad, Tolerancia a fallos, Capacidad de recuperación
	Seguridad	Confidencialidad, Integridad, No repudio, Autenticidad, Responsabilidad
	Capacidad de mantenimiento	Modularidad, Reusabilidad, Capacidad de ser analizado, Capacidad de ser cambiado, Capacidad de ser probado
	Portabilidad	Adaptabilidad, Instalabilidad, Intercambiabilidad

Una de las nuevas características la compatibilidad, hace referencia a la posibilidad de intercambio de información entre sistemas o componentes. La otra característica, seguridad, es incorporada para indicar el grado de disponibilidad y protección de la información o datos frente a accesos no autorizados. El modelo de calidad en uso presenta respecto a la 9126 una característica más, es decir presenta cinco características. La nueva característica denominada contexto de uso, indica el grado de uso con efectividad, eficiencia, seguridad y con satisfacción en el contexto especificado. La relación entre ISO/IEC 9126 y SQUARE se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Relación ISO/IEC 9126 y SQUARE [8]

ISO/IEC	SQUARE
9126-1: QualityModel	25000: Guide to SQUARE 25010: Quality Model and Guide
9126-2: Externalmetrics	25020: Measurement referente model and guide 25023: Measurement of external quality
9126-3: Internalmetrics	25020: Measurement referente model and guide 25022: Measurement of internal quality
9126-4: Quality in use metrics	25020: Measurement referente model and guide 25024: Measurement of quality in use

### 3.1 Modelo de calidad del producto ISO/IEC 25010

El modelo de calidad se encuentra representado por ocho características cada una de las cuales posee sus propias sub-características, las cuales se definen así:

- *Adecuación Funcional* [7]. Representa la capacidad del producto software para proporcionar funciones que satisfacen las necesidades declaradas e implícitas, cuando el producto se usa en las condiciones especificadas. Esta característica se subdivide a su vez en las siguientes sub-características:
  - Completitud funcional. Grado en el cual el conjunto de funcionalidades cubre todas las tareas y los objetivos del usuario especificados.
  - Corrección funcional. Capacidad del producto o sistema para proveer resultados correctos con el nivel de precisión requerido.
  - Pertinencia funcional. Capacidad del producto software para proporcionar un conjunto apropiado de funciones para tareas y objetivos de usuario especificados.
- *Eficiencia de desempeño* [7]. Esta característica representa el desempeño relativo a la cantidad de recursos utilizados bajo determinadas condiciones. Esta característica se subdivide a su vez en:
  - Comportamiento temporal. Los tiempos de respuesta y procesamiento y los ratios de *throughput* de un sistema cuando lleva a cabo sus funciones bajo condiciones determinadas en relación con un banco de pruebas (*benchmark*) establecido.
  - Utilización de recursos. Las cantidades y tipos de recursos utilizados cuando el software lleva a cabo su función bajo condiciones determinadas.
  - Capacidad. Grado en que los límites máximos de un parámetro de un producto o sistema software cumple con los requisitos.
- *Compatibilidad* [7]. Capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y/o llevar a cabo sus funciones requeridas cuando comparten el mismo entorno hardware o software. Se subdivide en:
  - Coexistencia. Capacidad del producto para coexistir con otro software independiente, en un entorno común, compartiendo recursos comunes sin detrimento.
  - Interoperabilidad. Capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada.
- *Usabilidad* [7]. Capacidad del producto software para ser entendido, aprendido, usado y resultar atractivo para el usuario, cuando se usa bajo determinadas condiciones. Esta característica se subdivide en:
  - Capacidad para reconocer su adecuación. Capacidad del producto que permite al usuario entender si el software es adecuado para sus necesidades.
  - Capacidad de aprendizaje. Capacidad del producto que permite al usuario aprender su aplicación.
  - Capacidad para ser usado. Capacidad del producto que permite al usuario operarlo y controlarlo con facilidad.
  - Protección contra errores de usuario. Capacidad del sistema para proteger a los usuarios de hacer errores.
  - Estética de la interfaz de usuario. Capacidad de la interfaz de usuario de agrandar y satisfacer la interacción con el usuario.
  - Accesibilidad. Capacidad del producto que permite que sea utilizado por usuarios con determinadas características y discapacidades.
- *Fiabilidad* [7]. Capacidad de un sistema o componente para desempeñar las funciones especificadas, cuando se usa bajo unas condiciones y periodo de tiempo determinados. Esta característica se subdivide a su vez en las siguientes sub-características:
  - Madurez. Capacidad del sistema para satisfacer las necesidades de fiabilidad en condiciones normales.
  - Disponibilidad. Capacidad del sistema o componente de estar operativo y accesible para su uso cuando se requiere.

- Tolerancia a fallos. Capacidad del sistema o componente para operar según lo previsto en presencia de fallos hardware o software.
- Capacidad de recuperación. Capacidad del producto software para recuperar los datos directamente afectados y reestablecer el estado deseado del sistema en caso de interrupción o fallo.
- *Seguridad* [7]. Capacidad de protección de la información y los datos de manera que personas o sistemas no autorizados no puedan leerlos o modificarlos. Esta característica se subdivide a su vez en las siguientes sub-características:
  - Confidencialidad. Capacidad de protección contra el acceso de datos e información no autorizados, ya sea accidental o deliberadamente.
  - Integridad. Capacidad del sistema o componente para prevenir accesos o modificaciones no autorizados a datos o programas de ordenador.
  - No repudio. Capacidad de demostrar las acciones o eventos que han tenido lugar, de manera que dichas acciones o eventos no puedan ser repudiados posteriormente.
  - Responsabilidad. Capacidad de rastrear de forma inequívoca las acciones de una entidad.
  - Autenticidad. Capacidad de demostrar la identidad de un sujeto o un recurso.
- *Mantenibilidad* [7]. Esta característica representa la capacidad del producto software para ser modificado efectiva y eficientemente, debido a necesidades evolutivas, correctivas o perfectivas. Esta característica se subdivide a su vez en las siguientes sub-características:
  - Modularidad. Capacidad de un sistema o programa de ordenador (compuesto de componentes discretos) que permite que un cambio en un componente tenga un impacto mínimo en los demás.
  - Reusabilidad. Capacidad de un activo que permite que sea utilizado en más de un sistema software o en la construcción de otros activos.
  - Analizabilidad. Facilidad con la que se puede evaluar el impacto de un determinado cambio sobre el resto del software, diagnosticar las deficiencias o causas de fallos en el software, o identificar las partes a modificar.
  - Capacidad para ser modificado. Capacidad del producto que permite que sea modificado de forma efectiva y eficiente sin introducir defectos o degradar el desempeño.
  - Capacidad para ser probado. Facilidad con la que se pueden establecer criterios de prueba para un sistema o componente y con la que se pueden llevar a cabo las pruebas para determinar si se cumplen dichos criterios.
- *Portabilidad* [7]. Capacidad del producto o componente de ser transferido de forma efectiva y eficiente de un entorno hardware, software, operacional o de utilización a otro. Esta característica se subdivide a su vez en las siguientes sub-características:
  - Adaptabilidad. Capacidad del producto que le permite ser adaptado de forma efectiva y eficiente a diferentes entornos determinados de hardware, software, operacionales o de uso.
  - Capacidad para ser instalado. Facilidad con la que el producto se puede instalar y/o desinstalar de forma exitosa en un determinado entorno.
  - Capacidad para ser reemplazado. Capacidad del producto para ser utilizado en lugar de otro producto software determinado con el mismo propósito y en el mismo entorno.

#### 4. APLICACIÓN DEL MÉTODO GQM

El método GQM (Goal, Questions, Metric) [5], parte de un objetivo claro de qué y porqué se quiere medir para luego plantear unas preguntas que serán relacionadas con unas métricas de esta manera se construye el modelo de medición para la las aplicaciones de escritorio. Una vez desarrollado se aplicará el modelo en los proyectos que tengan las características de aplicaciones escritorio de los proyectos de grado del programa de ingeniería de sistemas y se realizará un análisis de estos resultados. Se parte de establecer los objetivos, las preguntas y las métricas que hacen parte de esta medición. A continuación, en la Tabla 4 se aplica una plantilla propuesta por Bassili en 1994 y expuesta por Piattini [4] en su libro Calidad de Sistemas Informáticos para definir los objetivos de medición.

**Tabla 4.1** Plantilla de Definición de GQM [4]

Analizar	el objeto de estudio bajo medición
Con el propósito de	entender, controlar o mejorar el objeto
Con respecto a	el enfoque de calidad del objeto en el que se centra la medición
Desde el punto de vista de	o perspectiva de las personas que miden el objeto
En el contexto de	el entorno en el que la medición tiene lugar

Una vez aplicada esta plantilla se llega al resultado que se muestra en la Tabla 5. A partir de la definición del objetivo principal de medición se empiezan a plantear preguntas como cuáles son las métricas para medir el objeto asociado

a un determinado objetivo. La primera pregunta a considerar para el objetivo antes planteado es: ¿Cuáles son los entregables de las fases de un desarrollo de software de escritorio que ayuden a mejorar la comprensión para que el evaluador del proyecto pueda mantener la calidad y mejore la mantenibilidad?

**Tabla 5.** Plantilla de Definición para modelo de calidad para las aplicaciones de escritorio [4]

Analizar	Los entregables de las fases de análisis, diseño e implementación de aplicaciones de escritorio
Con el propósito de	Evaluar los componentes de las fases de análisis, diseño e implementación de aplicaciones de escritorio
Con respecto a	La funcionalidad y entendibilidad de las aplicaciones de escritorio
Desde el punto de vista de	Los evaluadores
En el contexto de	La mejora del producto en las diferentes fases de desarrollo

Bajo la consideración de la anterior pregunta la propuesta se realizará entonces alrededor de los entregables mínimos para poder comprender el software desarrollado y que pueda aportar a su mantenibilidad. Con ello estaríamos centrándonos en el objetivo propuesto y es mejorar mantenibilidad y la entendibilidad para hacerle más sencillo el trabajo de evaluación al desarrollador y a los futuros mantenedores de la aplicación, pues cada uno de los productos propuestos son los que entrarán a hacer parte fundamental de las fases de desarrollo y ayudarán a simplificarla. Al docente evaluador del proyecto le permitirá en fases tempranas tener claridad sobre los artefactos y cómo deberían estar diseñados para cumplir con estas expectativas de calidad.

## 5. ARTEFACTOS SOBRE LOS QUE SE REALIZA LA MEDICIÓN

Definidas las metas de evaluación se debe establecer qué artefactos serán objeto de medición, para ello se realiza una encuesta entre los evaluadores y directores de proyectos de grado clasificados como desarrollos de software, además se revisa una propuesta realizada por un grupo de estudiantes y un docente sobre los entregables mínimos que debía tener cualquier proyecto de los mencionados y finalmente se llegó al siguiente resultado que se resume en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Entregables mínimos para la fase de análisis de las aplicaciones de escritorio

Análisis	
Artefactos	Entregable
Entrevista con el Cliente para la definición de requerimientos	Documento de Especificación de Requisitos
Listado de requerimientos funcionales y no funcionales	
Casos de uso	
Cronograma de Actividades	
Diagrama de Casos de Uso	
Modelo Entidad-Relación	
Diccionario de datos	
Diseño	
Artefactos	Entregable
Modelo Relacional	Documento Arquitectura del Sistema
Diagrama de clases	
Esbozos de interfaz de usuario (Entradas y Salidas)	
Esquema gráfico de la Arquitectura	
Implementación	
Artefactos	Entregable
Incremento del Software funcionando	Manuales de Usuario
Código fuente	Programa
Script de base de datos	Diccionario de Datos Actualizado

## 6. PROPUESTA DE INDICADORES PARA REALIZAR LA MEDICIÓN

Teniendo en cuenta que se encuentran diverso tipo de indicadores según la métrica, que éstos ayudan al cálculo de las mismas y que una vez aplicada la fórmula de cálculo se interpretan éstos resultados para lograr conocer qué tan aceptable es el producto software entregado, se propone en ésta investigación experimentar el indicador que se encuentra en el trabajo realizado por Beleño [9]. “La diversidad de propuestas en lo relativo a calcular los diferente tipos de métricas que en su conjunto miden atributos distintos y cuyos valores en cuanto a qué se consideraba un buen valor para considerar el modelo como excelente, aceptable o deficiente llevó a realizar la propuesta de un indicador que pudiese medir cada una de las métricas seleccionadas para el modelo de indicadores sin importar si para un atributo los rangos de valores aceptables fuesen bajos o altos” [9]. Se presenta entonces el indicador propuesto por Beleño [9], para la medición de las métricas seleccionadas. Cuando en los valores de interpretación de la métrica el valor más bajo es malo y el más alto es bueno, sería un indicador que se denominará de tipo I y se calculará de la forma como se presenta en la ecuación (1).

$$y = \frac{Min_{aceptable} - X_{valor-real}}{Min_{aceptable} - Max_{aceptable}} \quad (1)$$

Donde  $Min_{aceptable}$  el valor mínimo aceptable que el evaluador experto considera es el mínimo para ése modelo,  $Max_{aceptable}$  el valor máximo aceptable que el evaluador experto considera es el máximo para ése modelo y  $X_{valor-real}$  el valor real que se observa en el modelo. Cuando en los valores de interpretación de la métrica el valor más bajo es

considerado bueno y el más alto malo, se utilizará un indicador que se denominará de tipo II y se calculará con la fórmula que aparece en la ecuación (2).

$$y = \frac{Max_{acceptable} - X_{valor-real}}{Max_{acceptable} - Min_{acceptable}} \quad (2)$$

La interpretación de los términos que hacen parte de la fórmula son los mismos que se explicaron en la ecuación (1). Esta fórmula permite normalizar todas las mediciones para realizar los cálculos independientes del tipo de métrica y de sus rangos de aceptación. Una vez normalizados los datos se pasa a la interpretación de los resultados, para ello se plantean unos rangos favorables en cuanto a la exigencia en el ámbito de los estudiantes de pregrado, de igual forma, si se desea ser más exigente con los modelos pues éstos rangos los puede cambiar el evaluador del proyecto. Los rangos de aceptabilidad serían los de la Tabla 7.

**Tabla 72.** Rangos de aceptabilidad del modelo de indicadores para aplicaciones escritorio

Rango de valores	Concepto
0 - 0,3	Malo
0,4 - 0,7	Aceptable
0,8 - 1	Excelente

Una vez calculados los valores de las métricas y los atributos se busca conocer el valor de aceptabilidad de la característica, para ello se le asignarán pesos a los atributos que indicarán qué tan importante es para el evaluador ése atributo con respecto a los otros cuidando que la suma de los pesos de los atributos para una característica no sea mayor que uno. Esta es la primera agregación que se hace de los atributos de cada característica; luego se deben agregar los valores de las características para sacar la conclusión completa del modelo en cuanto a la calidad interna del producto en la característica que se va a medir, también se proponen pesos para que el evaluador le dé la importancia a cada característica dentro del factor y así se pueda conocer el resultado de aceptación de todo el modelo evaluado. En la Tabla 8 se presenta un ejemplo.

**Tabla 8.** Ejemplo de agregación de pesos a los atributos y características para el cálculo final del factor de calidad interna

Característica	Peso	Atributo	Peso	Métrica
Usabilidad	0,6	Legibilidad	0,4	Métrica1
		Comprensibilidad	0,3	Métrica2
		Fac.Aprendizaje	0,3	Métrica3
		<i>Total suma atributos</i>	1	
Mantenibilidad	0,4	Capac. De ser analizado	0,6	Métrica4
		Capac. De ser cambiado	0,4	Métrica5
		<i>Total suma atributos</i>	1	

## 7. CONCLUSIONES

La propuesta de un tipo de indicador para medir cualquier tipo de métrica realmente es un desafío grande puesto que cada métrica puede llegar a tener mediciones en diferente tipo de rangos, sin embargo, realizar las mediciones y aplicar el modelo para los proyectos de grado clasificados como aplicaciones de escritorio es el paso a seguir para posteriormente hacer un análisis y luego tratar de medir con el mismo indicador otros tipos de software.

Por otra parte, se presenta una combinación de métodos como el GQM acompañados de la norma ISO 25000 y luego aplicando el indicador propuesto, esto hace que la investigación no se convierta en sólo la aplicación y comprensión de una norma.

Finalmente, la propuesta de un solo indicador debe ser validada por investigadores que tengan experiencia en medición de software, pues hasta ahora lo que se ha podido observar es que la efectividad de la medición depende del grado de experiencia que tenga el evaluador, podría ser muy subjetiva la evaluación del software con ésta propuesta.

Las empresas desarrolladoras de software deben tener claro cuál es el objetivo de realizar la medición que realizarán del software para tener claro las metas donde se llegará con la evaluación aplicada. Para las instituciones educativas del orden superior es benéfico estandarizar la medición no sólo del producto que entregan sus egresados sino del proceso como realizan el mismo, pues esto ayuda a mejorar la visión que tendrá el sector empresarial del producto entregado por los programas de ingeniería de sistemas en el país.

## REFERENCIAS

- [1] Pressman, R. (2010). Ingeniería del Software, Un enfoque práctico. McGraw Hill.
- [2] Velia, A., Sánchez, A. & Montejano, G. (2010). Definición de métricas de calidad para productos software. Documento de investigación. Sedici, Argentina.
- [3] Fenton, N. & Pfleeger, S. (1997). Software metrics: a rigorous & practical approach. Documento de investigación. PWS Publishing company.
- [4] Piattini, M. et al. (2009). Calidad de sistemas informáticos. Alfa Omega.
- [5] Piattini, M. et al. (2008). Medición y estimación de software. Técnicas y métodos. Alfa omega.
- [6] Piattini, M et al. (2003). Calidad en el desarrollo y el mantenimiento del software. Alfa omega.
- [7] ISO 25000 - Calidad del Producto Web. ISO. Online [Mar 2018].
- [8] Scalone, F. (2006). Estudio comparativo de los modelos y estándares de calidad de software. Tesis de maestría. Laboratorios Investigación Universidad de Buenos Aires.
- [9] Beleño, K. (2016). Modelo de indicadores para la fase de diseño de aplicaciones web en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. Trabajo de maestría.

# Propuesta de una arquitectura distribuida para un sistema de análisis inteligente de sentimientos: Una aplicación del marco de trabajo TOGAF®

Julio Martínez Z.<sup>1</sup>

Jorge Giraldo P.<sup>2</sup>

Sandra Mateus S.<sup>3</sup>

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín – Antioquia

El presente capítulo muestra la propuesta de una arquitectura distribuida aplicada al diseño de un sistema inteligente de análisis de sentimientos, el cual evalúa automáticamente a las personas mediante el movimiento de la retina y apoya en las empresas en la toma de decisiones referente a los procesos de selección de personal. Se realiza empleando el marco de trabajo TOGAF® en su versión más reciente 9.1, siguiendo paso a paso sus métodos establecidos en la guía, centrado en las vistas arquitectónicas y haciendo la representación mediante diagramas con el estándar UML 2.0; aunque el lenguaje estándar ADL utilizado por TOGAF® es *Archimate*, en la presente propuesta se logra diseñar las vistas de la arquitectura con UML, puesto que el marco de trabajo no restringe la utilización de otros estándares como éste. Se establece la utilidad y aplicabilidad de TOGAF en arquitecturas distribuidas y se obtiene como resultado principal artefactos propuestos por el marco de trabajo que detallan los elementos de la arquitectura distribuida adaptable al sistema inteligente de análisis de sentimientos con la utilización de buenas prácticas, y que sirven para continuar el desarrollo total del Sistema, implementaciones del resto de funcionalidades, mantenibilidad, migraciones, y la mejora continua de la calidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el avance de los sistemas de información, las grandes empresas han tenido la necesidad de migrar a Arquitecturas con Sistemas distribuidos, esto es una posible solución para el manejo de los grandes volúmenes de datos, estos necesitan recursos de Hardware y Software especializados para poder ser tratados de la manera más óptima. En la actualidad los grandes sistemas de información son distribuidos por las grandes ventajas y características, principalmente: escalabilidad, Tolerancia a Fallos, *Clustering*, Apertura, compartición de recursos, concurrencia, entre otros. Un Sistema distribuido es aquel en el que el procesamiento de información se distribuye sobre varias computadoras en vez de estar confinado en una sola máquina [1]. Esto es transparente al usuario final, el Sistema Distribuido funciona como si fuera uno solo.

Se considera el aprendizaje de máquina (*Machine Learning*) como una disciplina bastante usada en la actualidad y que ha adquirido durante estos años bastante aplicabilidad en distintos otros campos. Para el sistema que se trata en el presente capítulo, por ejemplo, es aplicado al campo de la psicología, realizan análisis de sentimientos, que es un campo de investigación en la minería de texto, es el tratamiento computacional de las opiniones, los sentimientos.

En el presente capítulo se hace la propuesta de una arquitectura distribuida de un sistema inteligente de aprendizaje de máquina para apoyo en la selección de personal en las empresas mediante la detección de distintos patrones como el movimiento de la retina, utilizando el Framework TOGAF®. TOGAF es un marco de trabajo para el diseño arquitectónico de software en distintos ámbitos de la autoría de “*The Open Group*” seguido, probado y usado por importantes empresas a nivel mundial.

La arquitectura propuesta es una arquitectura distribuida, para este caso y teniendo en cuenta que es para un sistema de aprendizaje de máquina, será de estilo arquitectónico de Servicios/Servidores (aproximada a arquitectura orientadas a servicios SOA). Los sistemas distribuidos pueden realizar el procesamiento de grandes volúmenes de datos, un sistema de *machine learning* arrojará mejores salidas y/o resultados de las predicciones, entre mayor sea el número de entradas.

El resto del documento se estructura de siguiente manera: En la sección 2 se presentan los conceptos y definiciones relacionadas a la presente propuesta. La sección 3 muestra los trabajos relacionados. Luego en la sección 4, el diseño de la arquitectura propuesta con una fase preliminar y siguiendo paso a paso las fases principales del método de desarrollo de la arquitectura (*ADM*, por sus siglas en inglés) que sirvan para el contexto del modelo de *machine learning*, pero centrado en las vistas arquitectónicas. En la sección 5 parte se hará un análisis y resultado, y finalmente las conclusiones y trabajo futuro.

## 2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan una serie de conceptos importantes para el mejor entendimiento del presente escrito. Siguiendo un orden secuencial e iniciando con el concepto general de lo que es arquitectura de software, una arquitectura distribuida; luego, la definición de arquitectura empresarial, para después hacer referencia al marco de

---

<sup>1</sup> julio\_martinez54172@elpoli.edu.co

<sup>2</sup> jegiraldo@elpoli.edu.co

<sup>3</sup> spmateus@elpoli.edu.co



trabajo TOGAF, cabe mencionar que en la metodología de desarrollo de arquitectura solo se mencionarán las fases A, B, C y D, que fueron las aplicadas a la presente propuesta, ya que es por el momento se limita a plantear el diseño arquitectónico enfocado a las vistas de dicho marco de trabajo. Finalmente se define aprendizaje máquina para entender mejor el modelo y su funcionamiento.

## 2.1 Arquitectura de Software

La arquitectura de software de un sistema de programa o computación es la estructura de las estructuras del sistema, la cual comprende los componentes del software, las propiedades de esos componentes visibles externamente, y las relaciones entre ellos [2]. Se presentan otras definiciones en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Conceptualización de Arquitectura de Software

Concepto	Fuente
La arquitectura de un sistema es la organización o estructura de sus partes más relevantes, lo que permite tener una visión común entre todos los involucrados (desarrolladores y usuarios) y una perspectiva clara del sistema completo, necesaria para controlar el desarrollo.	[3]
La arquitectura del software de un programa o sistema informático es la estructura o estructuras de el sistema, que comprende elementos de software, las propiedades visibles externamente de aquellos elementos, y las relaciones entre ellos.	[4]

### 2.1.1 Arquitectura de sistemas distribuidos

Un sistema distribuido es un sistema en el que el procesamiento de información se distribuye sobre varias computadoras en vez de estar confinado en una única máquina. Obviamente, la ingeniería de sistemas distribuidos tiene mucho en común con la ingeniería de cualquier otro software, pero existen cuestiones específicas que deben tenerse en cuenta cuando se diseña este tipo de sistemas [5].

- *Arquitectura tipo SOA (Services Oriented Architecture).* Las arquitecturas orientadas a servicios (SOA) se refieren a un paradigma arquitectónico específico que enfatiza implementación de componentes como servicios modulares que pueden ser descubierto y utilizado por los clientes. Infraestructuras basadas en los principios de SOA se llaman Infraestructuras Orientadas a Servicios (SOIs). A través de la agilidad, escalabilidad, elasticidad, autoservicio rápido aprovisionamiento y virtualización de hardware, Servicio Los principios de Arquitectura Orientada se reflejan en *Clouds*, que proporcionan la capacidad de adaptar de manera eficiente los recursos aprovisionamiento a las demandas dinámicas de los usuarios de Internet [6].
- *Arquitectura Empresarial (EA, Enterprise Architecture).* Otro concepto para clave e importante es el de Arquitectura Empresarial. Es la disciplina que trata con la organización de los recursos de la empresa. El objetivo de un proyecto de EA es definir e implementar las estrategias que guiarán a la empresa en su evolución. Es un conjunto coherente de principios, métodos y modelos que son utilizado en el diseño y la realización de la organización de la empresa estructura, procesos de negocios, sistemas de información, e infraestructura [7].
- *Arquitectura Cliente – Servidor.* En una arquitectura cliente-servidor, una aplicación se modela como un conjunto de servicios proporcionado por los servidores y un conjunto de clientes que usan estos servicios. Los clientes necesitan conocer que servidores están disponibles, pero normalmente no conocen la existencia de otros clientes. Clientes y servidores son procesos diferentes que representan un modelo lógico de una arquitectura distribuida cliente-servidor [8].

## 2.2 TOGAF (The Open Group Architecture Framework)

TOGAF es un marco de referencia de arquitectura. En términos simples, TOGAF es una herramienta para asistir en la aceptación, creación, uso, y mantenimiento de arquitecturas. Está basado en un modelo iterativo de procesos apoyado por las mejores prácticas y un conjunto reutilizable de activos arquitectónicos existentes. TOGAF maneja cuatro (4) grandes grupos de arquitecturas: Arquitectura de negocios, Arquitectura de aplicaciones, Arquitectura de Datos, Arquitectura tecnológica. TOGAF refleja la estructura y el contenido de la capacidad arquitectónica dentro de una empresa. [9]

- *Arquitectura de Negocio:* Define la estrategia de negocio, gobierno, organización y procesos críticos de negocio formalizar y se puede socializar mejor en el contexto donde se generan las relaciones laborales.
- *Arquitectura de Aplicación:* Indica cómo deben implementarse, relacionarse entre sí y con los procesos de negocio de la organización los sistemas de aplicación.
- *Arquitectura de Datos:* Describe la estructura de la información lógica y física de los datos de una organización y los recursos de administración de datos.
- *Arquitectura de Tecnología:* Indica la infraestructura de software y hardware necesario para el desarrollo de aplicaciones de negocio. Contiene por ejemplo la infraestructura de TI, middleware, red, etc.

### 2.2.1 Metodologías de desarrollo de la arquitectura (ADM por sus siglas en inglés)

EL ADM es el resultado de las contribuciones de numerosos profesionales de la arquitectura y constituye el núcleo de TOGAF. Es un método para obtener arquitecturas empresariales específicas para la organización, y está especialmente diseñado para responder a los requerimientos del negocio [9]. En la Figura 1, se muestra el ciclo completo del ADM.

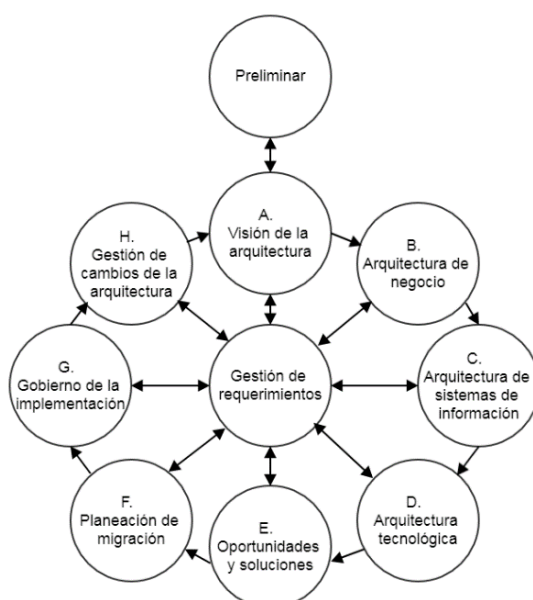


Figura 1. TOGAF ADM [9]

- *Preliminar*. Prepara la organización para llevar a cabo proyectos exitosos de arquitectura gracias al uso de TOGAF, Emprende las actividades de iniciación y preparación requeridas para crear la capacidad arquitectónica, incluyendo la adaptación de TOGAF, la selección de herramientas y la definición de principios de Arquitectura [9].
- *Fase A- Visión de la Arquitectura*. Comienza con la recepción de una solicitud de trabajo de arquitectura de la organización patrocinadora a la organización de arquitectura [9].
- *Arquitecturas (Negocio, Sistemas de Información, tecnológica)*. La arquitectura de negocio describe la estrategia de producto y / o servicio, y los aspectos organizativos, funcionales, de proceso, de información y geográficos del entorno empresarial. La Arquitectura de Sistema de Información, implica una combinación de datos y arquitectura de aplicaciones, en cualquier orden. Existen defensores para ambas secuencias. Por ejemplo, el *Enterprise Architecture Planning* (EAP) de Steven Spewak recomienda un enfoque basado en datos. En La arquitectura tecnológica, el equipo de arquitectura deberá considerar qué recursos relevantes de Arquitectura Tecnológica están disponibles en el Repositorio de Arquitectura [9].

### 2.3 Notaciones para la representación de arquitecturas

- *Archimate*. Es un estándar de *Open Group*, es un lenguaje de modelado abierto e independiente para Arquitectura Empresarial que cuenta con el respaldo de diferentes proveedores de herramientas y firmas de consultoría. Proporciona uniformes representaciones para diagramas que describen Arquitecturas Empresariales. El lenguaje ArchiMate define tres capas principales basadas en especializaciones de sus conceptos centrales: Capa de negocios, de aplicación, de tecnología [9].
- *UML*. El lenguaje de modelado unificado (UML) es un lenguaje visual para especificar, construir y documentar los artefactos de los sistemas. Es la notación de modelado más ampliamente utilizada en la industria del software hoy en día, y es una Especificación del grupo de gestión de objetos (OMG). UML es una de las principales especificaciones que admite Arquitectura Dirigida por Modelo (*Model Driven Architecture*, MDA), que también ha sido estandarizada por OMG [10]. En la Tabla 2, se presenta la relación entre los elementos de diagramación o representación Archimate y UML.

Tabla 2. Equivalencia elementos UML vs Archimate [11]

Archimate	UML
Actor de Negocio, Rol	Actor
Requerimiento + Servicio	Caso de Uso
Componente de Aplicación	Componente
Objeto de negocio, objeto de datos	Clase
Colaboración de Aplicación	Colaboración
Nodo, Dispositivo, Software del sistema	Nodo, Dispositivo, Ambiente de ejecución
Artefacto	Artefacto
Interfaz de aplicación + Servicio	Interfaz
Agregación, Composición, Especialización	Agregación, Composición, Generalización

### 2.4 Aprendizaje de Máquina

El aprendizaje computacional o de Máquina (*Machine Learning*, en inglés) estudia la construcción de sistemas capaces de aprender a partir de datos. La mayoría de los métodos inductivos de aprendizaje automático se ha aplicado con

éxito para la clasificación de texto, que se pueden asignar en tres paradigmas principales: inducción de regla, modelización probabilística y mejoramiento.

### 2.4.1 Aprendizaje Máquina Supervisado

- *Etiquetas*. Una etiqueta es el valor que estamos prediciendo, es decir, la variable  $y$  en la regresión lineal simple. La etiqueta podría ser el precio futuro del trigo, el tipo de animal que se muestra en una imagen, el significado de un clip de audio o simplemente cualquier cosa
- *Atributos*. Un atributo es una variable de entrada, es decir, la variable  $x$  en la regresión lineal simple. Un proyecto de aprendizaje automático simple podría usar un solo atributo, mientras que otro más sofisticado podría usar millones de atributos, especificados como:  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$
- *Modelos*. Un modelo define la relación entre los atributos y la etiqueta. Por ejemplo, un modelo de detección de spam podría asociar de manera muy definida determinados atributos con "es spam". Destaquemos dos fases en el ciclo de un modelo: *Entrenamiento* significa crear o aprender el modelo. Es decir, le muestras ejemplos etiquetados al modelo y permites que este aprenda gradualmente las relaciones entre los atributos y la etiqueta [15].

## 3. TRABAJOS RELACIONADOS

En el trabajo de grado de Maestría titulado "Arquitectura Empresarial para la Dirección de Tecnología de Información y Comunicación de la Universidad de Cuenca", se expone el diseño de una Arquitectura Empresarial donde se pretende sustituir la Arquitectura actual por una con el Framework TOGAF, se destaca la importancia y el proceso para llegar a ella [16]. En [17], muestran a MLBase, un Sistema de *Machine Learning* Distribuido, en el que se refieren a *Machine Learning* como clave para la transformación del *Big Data*. Y se habla de un Sistema escalable, optimizador, eficaz. No se menciona el Framework TOGAF para el diseño de la Arquitectura.

En el artículo "*MXNet: A Flexible and Efficient Machine Learning Library for Heterogeneous Distributed Systems*", se hace referencia a una librería eficiente que trabaja con *Machine Learning* y para Sistemas distribuidos. En el trabajo se describe el diseño del API y la implementación de MXNet [18]. Archimate es una notación propia de "*The Open Group*", pero UML sigue siendo más popular; siendo ambos para el modelado existe una relación entre ambas notaciones. Se hace aquí una propuesta para el mapeo entre Archimate y UML [19], esto servirá para la propuesta de las vistas arquitectónica del presente capítulo.

En el artículo [20], se presenta la propuesta de una Arquitectura Empresarial con TOGAF para las IES de tamaño mediano, estableciendo que las AE también pueden ser aplicadas a este ámbito. Y manifestando que con esto se puede lograr la compenetración entre la institución educativa y las TI y maximizar su utilidad. Otra propuesta Arquitectónica en el ámbito educativo es el Trabajo de Pregrado titulado "Diseño De Arquitectura Empresarial En El Sector Educativo Colombiano: Caso Colegio Privado En Bogotá", en donde se hace uso también de TOGAF para el diseño de arquitectura Empresarial para ser aplicada a instituciones educativas de educación media privadas, y su importancia al implementarla [21].

El trabajo de grado de Maestría titulado "Una Arquitectura Empresarial Fundamentada En Togaf Para El Negocio De Distribución De Energía De La Central Hidroeléctrica De Caldas", se pretende la solución de la problemática en el ámbito TI de la compañía con el replanteamiento de su Arquitectura Empresarial, aplicando también el Marco de trabajo TOGAF paso a paso bajo el modelo ADM, a una Grande Empresa como lo es una Hidroeléctrica [22]. En [23] se desarrolla un modelo de predicción que utiliza Software en la Nube con *Machine Learning* (Azure) para el procesamiento de información. un modelo de predicción que determina en tiempo real la probabilidad de cancelación o retraso de un vuelo en función de las condiciones meteorológicas. Aquí no se utiliza TOGAF para la Arquitectura.

Además, se enfatiza en que UML se considera hoy día un estándar en el desarrollo de Software y que puede ser utilizado en el modelado de Arquitecturas Empresariales. Se presenta propuesta de Modelado para Arquitecturas Empresariales utilizando el Lenguaje de Modelado UML [24]. En [25] se expone un artículo sobre la aplicación del *framework* TOGAF en "gobierno electrónico" de una nación (Indonesia) basado en metodología de arquitectura orientada a servicios (SOA, en inglés), en donde resalta la necesidad e importancia de aplicar TOGAF con una arquitectura empresarial en este ámbito o contexto con resultados innovadores y beneficiosos. En el artículo se diseña: visión de la arquitectura; y las vistas: arquitecturas de negocio, sistema de información, tecnológica.

## 4. PROPUESTA DE LA ARQUITECTURA

En este apartado se llega a la propuesta arquitectónica con algunos de los artefactos de TOGAF del sistema inteligente de análisis de sentimientos en donde se describirá la fase preliminar y las distintas vistas arquitectónicas.

### 4.1 Fase Preliminar

A continuación, se presentan los principales elementos de la fase preliminar en donde se describe principalmente los responsables de realizar la propuesta arquitectónica y los distintos roles participantes del proceso.

#### 4.1.1 Definición de la Empresa

En la Maestría en Ingeniería con Énfasis en Arquitectura de Software se tiene como propuesta el desarrollo de un Modelo inteligente para el análisis de Sentimientos. En el equipo de Maestría se encuentran estudiantes de diferentes énfasis y un equipo de tutores que guían e imparten el conocimiento, y hace parte del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

#### 4.1.2 Estructura Organizacional

El equipo para este trabajo de Investigación está conformado por: Coordinadores, Profesores, estudiante del énfasis Arquitectura de Software. En la Figura 2, se visualiza de forma jerárquica los participantes directos y otros *stakeholders* del proyecto.



Figura 2. Jerarquía Organizacional Proyecto

Los estudiantes son los encargados del desarrollo del proyecto, con el acompañamiento y apoyo de los profesores, a su vez estos tienen una coordinación que va regida por la rectoría. A continuación, se muestra en la Figura 3, el organigrama completo del ente educativo “Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid”.

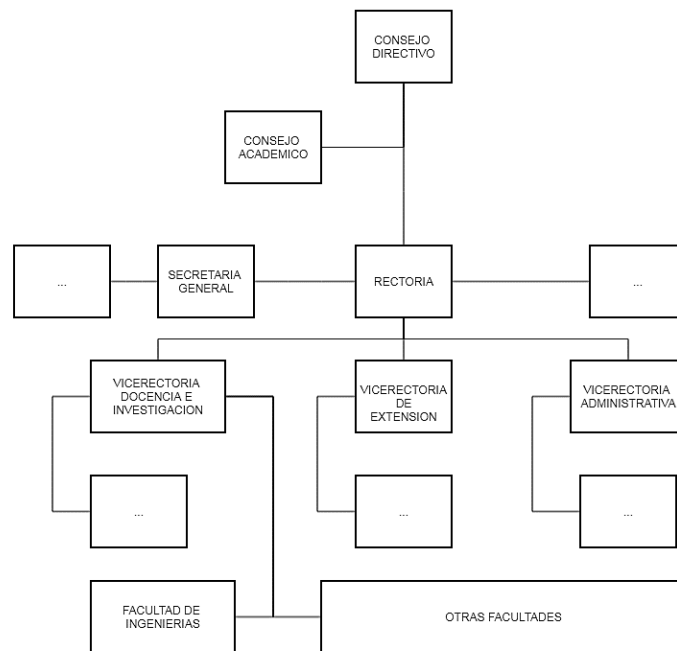


Figura 3. Organigrama Empresa Politécnico Colombiano JIC

#### 4.2 Fase A - Visión de la Arquitectura

El objetivo del proyecto es crear un Modelo de Análisis de Sentimientos para entrevistas laborales, que tiene como objetivo captar patrones como lo son: gestos faciales y seguimiento del movimiento de la retina con un sensor (*Webcam* convencional). En base a esto, mediante un prototipo se envía toda la información obtenida a un motor o módulo que utiliza *Machine Learning*, este realizará el proceso de todos los datos y dará un juicio para con esto apoyar a la decisión de las empresas en procesos de selección de personal, en las entrevistas conductuales estructuradas. Las funcionalidades del Modelo son:

- Seguimiento de la retina (*Eye Gazing*) en entrevistados.
- Reconocimiento facial (deformación del rostro) de entrevistados.
- Almacenamiento de los patrones y/o información de los anteriores.
- Procesamiento de volúmenes de datos mediante técnicas de *Machine Learning*.
- Consulta de resultados y criterios de los entrevistados.

Con esto, el entrevistador se apoyará en el modelo para sumar su opinión acerca del entrevistado, con la de dicho modelo concluir sobre la conducta o personalidad y tomar una decisión con la selección del personal.

### 4.3 Vistas – Arquitecturas (Fases B, C, D)

A continuación, se relacionan las vistas más importantes según el *framework* TOGAF, en donde se escoge un diagrama correspondiente adecuado para cada una de ellas, haciendo uso de la notación con UML.

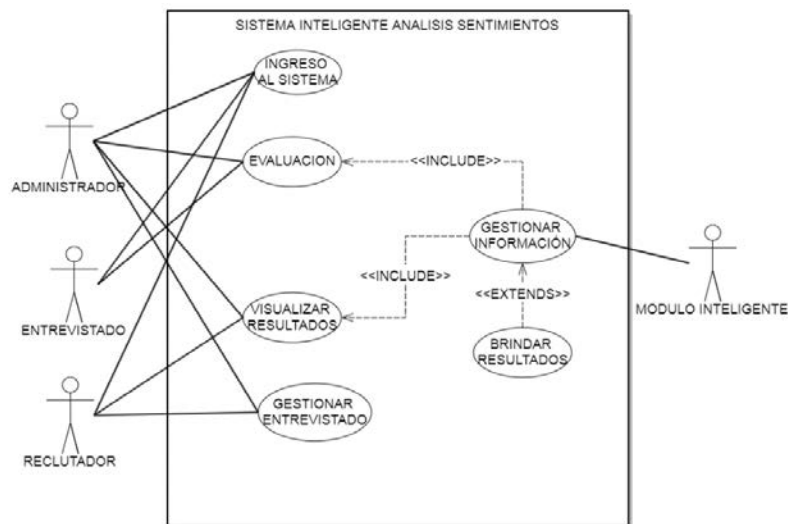
#### 4.3.1 Arquitectura de Negocio

En la Tabla 3, se relacionan los actores y roles del modelo y su correspondiente tipo.

**Tabla 3.** Actores y Roles del Modelo

Participantes	Roles	Tipo
Entrevistado	Realiza la evaluación propuesta por el Modelo	Persona
Entrevistador	Gestiona entrevistados, Analiza y visualiza los resultados arrojados por el Sistema vs su propio criterio	Persona
Administrador	Desarrollo y mantenimiento del Sistema	Persona
Profesores	Apoyo, guía del conocimiento	Persona
Módulo de <i>Machine Learning</i>	Gestión y procesamiento de información Evaluación Resultados para toma de decisiones	Computacional

Para la representación en diagrama UML se escoge como representativo un diagrama de casos de uso (Figura 4).

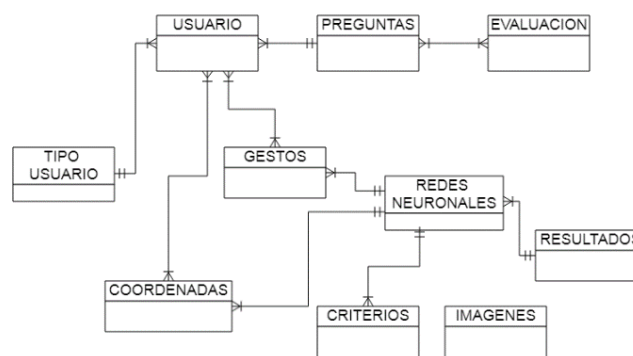


**Figura 4.** Casos de Uso General Sistema

La Figura 4 muestra el diagrama general del sistema de análisis de sentimientos incluyendo el prototipo funcional en relación con los actores de dicho sistema. Todos los usuarios deben tener permisos para acceder al sistema. El administrador tiene acceso a todos los módulos, el entrevistado solo al módulo de evaluación, el reclutador gestionar las evaluaciones, visualiza y analiza resultados. El módulo inteligente se encarga de gestionar y analizar la información ingresada y dar su opinión de forma automática.

#### 4.3.2 Arquitectura de Datos/Información, modelo de datos de la arquitectura

Después de “construir” la Arquitectura de negocio, a partir de esta se construye la de datos e información. A continuación, en la Figura 5, se muestra el modelo de datos mediante diagrama relacional propuesto para el Sistema Inteligente de análisis de sentimientos. En este caso se seleccionó este tipo de diagramas en UML para la representación.



**Figura 5.** Modelo Relacional BD Sistema software del Modelo

En la tabla de usuarios, están los usuarios del sistema, y tienen diferentes roles, tipo de usuario, que se almacenan en la tabla tipousuario; en la tabla de preguntas, se almacena un conjunto de preguntas para que el evaluado responda y sus resultados se almacenan en la tabla evaluación; en la tabla gestos, se almacenan los patrones de gestos captados por una cámara de los evaluados, al igual que en la tabla coordenadas, las coordenadas de la retina en la pantalla y el tiempo de duración que se mantuvo.

### 4.3.3 Arquitectura de Aplicación

Cuando de arquitectura de aplicaciones se trata los análisis en las grandes organizaciones se hacen con el apoyo del III-RM (*Integrated Information Infrastructure Reference Model*) propuesto por *The Open Group* dentro del marco del TRM (*Technical Reference Model*) de TOGAF. Se toma el diagrama de despliegue del Sistema propuesto para ilustrar y entender mejor la arquitectura de aplicación, como se muestra a continuación en la Figura 6.

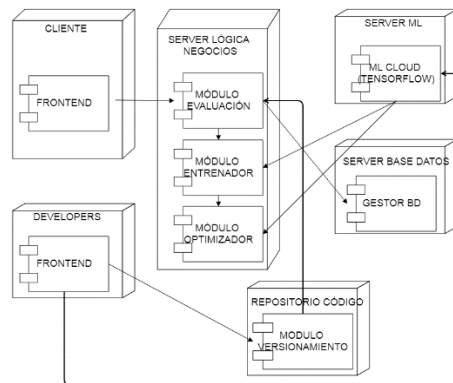


Figura 6. Diagrama de despliegue del Modelo

### 4.3.4 Arquitectura Tecnológica

Se proponen los siguientes diagramas, referentes a la arquitectura tecnológica del Sistema: en la Figura 7, se puede detallar el diagrama de red e infraestructura.

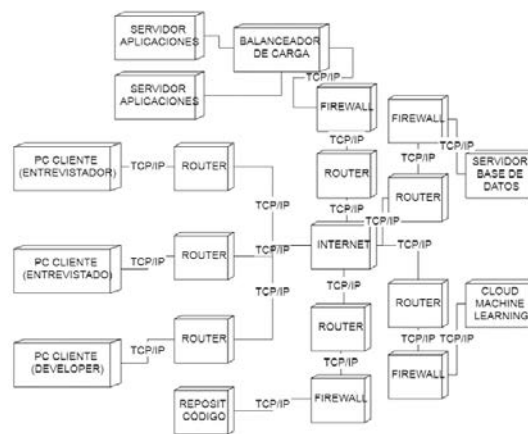


Figura 7. Diagrama de Red e Infraestructura Modelo

En la Figura 7, se muestra la interconexión de cada uno de los Nodos (Hardware) del diagrama de red, y el tipo de conexión mediante protocolo de comunicación entre cada uno de ellos (TCP/IP), Los nodos se encuentran distribuidos. Además, para tener más claridad se realiza un esbozo del funcionamiento del prototipo del Modelo, como se muestra en la Figura 8.

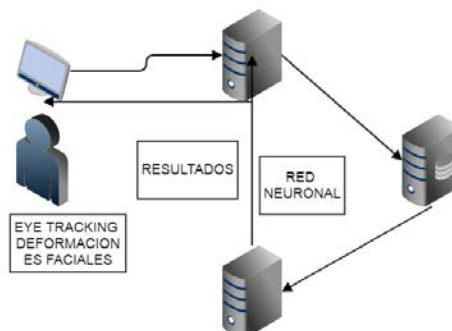
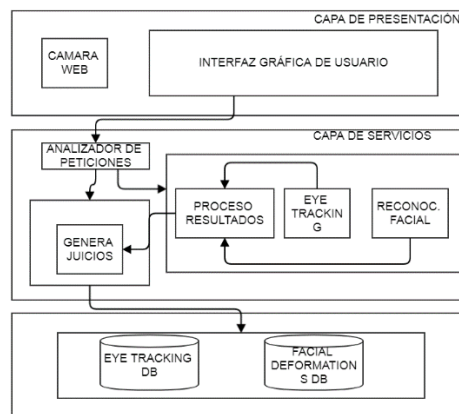


Figura 8. Esquema funcionamiento del Modelo

Finalmente, en la Figura 9 se presenta una propuesta de Arquitectura general del prototipo de Modelo basada en capas, incluyendo otros Estilos Arquitectónicos como: Repositorios y Servicios. En el prototipo del sistema el usuario entrevistado se coloca frente al computador que tiene un sensor (cámara web convencional), se interactúa con el servidor de aplicaciones quien tiene la lógica de negocios, este servidor se comunica y almacena la información en el servidor de base de datos. Los datos sirven para entrenar la red neuronal del sistema y arrojar resultados al cliente.



**Figura 9.** Arquitectura general basada en capas, propuesta del prototipo del sistema de análisis de sentimientos

En la capa de presentación se encuentra la interfaz de usuario del cliente; en la capa de servicios, está el módulo de análisis de sentimientos y el módulo de decisión de juicios. El módulo de análisis de sentimientos analiza las deformaciones faciales y posiciones de la retina, luego envía estos datos al sub módulo de proceso de resultados, éste a su vez, lo envía a genera juicios (incluido en módulo de decisión juicios); los datos son almacenados en la base de datos, perteneciente a la capa de datos.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En los artículos y trabajos mencionados en trabajos relacionados se pudo ver que dicho *Framework* es aplicado a medianas y grandes empresas, el caso de instituciones educativas de bachillerato hasta grandes empresas como una Hidroeléctrica. TOGAF es especialmente para Desarrollo de Arquitecturas empresariales, ha sido probado, utilizado por grandes compañías a nivel mundial, y sigue siendo mejorado, recomiendan utilizarlo con estilos arquitectónicos como SOA. Aunque TOGAF propone Archimate como su estándar propio, aunque se pueden utilizar otros lenguajes de descripción arquitectural (ADL) para los distintos modelados de los artefactos, como UML o BPMN, que en este caso se hizo uso de UML, teniendo en cuenta que hay equivalencias en sus componentes de diagramación y que el *Framework* no establece restricción alguna.

Un Sistema de *Machine Learning* es bastante adaptable a Arquitecturas distribuidas (SOA, por ejemplo), una arquitectura de alta disponibilidad en donde se pueda realizar el manejo de grandes volúmenes de datos: se puede ver como se adapta TOGAF al Modelo planteado identificando y diseñando cada uno de los artefactos de manera adecuada. En la presente investigación se propone una arquitectura distribuida, y se puede ver como se adapta TOGAF al Modelo planteado identificando y diseñando cada uno de los artefactos de manera adecuada.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente se ha mostrado una propuesta arquitectónica de un sistema inteligente para el análisis de sentimientos de manera resumida, pues la guía del *Framework* TOGAF es muy amplia, tiene una serie de pasos concretos y completos aplicando buenas prácticas con respectivos formatos para entregables bastante organizados. Sin embargo, en esta investigación solo se proponen las vistas arquitectónicas, por lo cual como trabajo futuro aplicar el resto de los pasos consignados en el Modelo de Diseño Arquitectural ADM de la guía TOGAF. Es decir, no solo enfocar el diseño Arquitectónico a las vistas, sino a todo el ámbito paso a paso.

## REFERENCIAS

- [1] Sommerville, I. (2005). *Ingeniería del Software*. McGraw Hill.
- [2] Pressman, R. (2001). *Ingeniería del Software, un enfoque práctico*. McGraw Hill.
- [3] Péraire, C. et al. (2007). *The IBM Rational Unified Process for System z*. Redbooks.
- [4] Bass, L., Clements, P. & Kazman, R. (2003). *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley.
- [5] Viedma, J. (2012). *Arquitectura de Sistemas Distribuidos – Parte I*. Universidad CAECE.
- [6] Dimosthenis, K. & Andreas, A. (2010). *A Real-time Service Oriented Infrastructure*. In Annual International Conference on Real-Time and Embedded Systems.
- [7] Lankhorst, M., Arbab, F. & Bosma, H. (2006). *Enterprise architecture: Management tool and blueprint for the organisation* Henk Jonkers. *Inf. Syst. Front.* 8, 63–66.
- [8] Vogel, O. et al. (2009). *Software Architecture, A comprehensive Framework and Guide for Practitioners*. Springer.
- [9] Josey, A. et al. (2013). *TOGAF® Versión 9.1*. The Open Group.
- [10] Armstrong, C. et al. (2013). *Using the ArchiMate® Language with UML*. The Open Group.
- [11] Silingas, D. & Butleris, R. (2009). *Towards customizing uml tools for enterprise architecture modeling*. Semantic Scholar.
- [12] Lankhorst, M. (2016). *Combining ArchiMate 3.0 with Other Standards & Techniques*. Bizzdesign Media.
- [13] Armstrong, C. et al. (2013). *Using the ArchiMate® Language with UML*. The Open Group.
- [14] Jara, J., Chacón, M., Zelaya, G. (2011). *Empirical evaluation of three machine learning method for automatic classification of neoplastic diagnoses*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 19(3), 359-368
- [15] Google Developers (2018). *Introducción al aprendizaje automático*. Google.
- [16] Álvarez, E. (2017). *Arquitectura Empresarial para la Dirección de Tecnología de Información y Comunicación de la Universidad de Cuenca*. Tesis de Maestría. Universidad de Cuenca.
- [17] Kraska, T., Talwalkar, A. & Duchi, J. (2013). *MLbase: A Distributed Machine-learning System*. In 6th Biennial Conference on Innovative Data Systems Research.
- [18] Chen, T. et al. (2015). *MXNet: A Flexible and Efficient Machine Learning Library for Heterogeneous Distributed Systems*. Computer Science.
- [19] Geicke, T. (2016). *ArchiMate to UML mapping*. Adocus AB.
- [20] Santiago, C. (2013). *Propuesta de una Arquitectura Empresarial para una Institucion de Educación Superior como un apoyo a su desarrollo frente a los retos del Siglo XXI*. Tesis de Maestría. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.
- [21] Ruiz, D. (2014). *Diseño De Arquitectura Empresarial En El Sector Educativo Colombiano: Caso Colegio Privado En Bogotá*. Tesis de Pregrado. Universidad Católica De Colombia.
- [22] Valencia, J. (2013). *Una arquitectura empresarial fundamentada en TOGAF para el negocio de distribución de energía de la central hidroeléctrica de caldas*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma De Manizales.
- [23] Iribarren, D. (2016). *Modelo predictivo. Machine learning aplicado al análisis de datos climáticos capturados por una placa sparkfun*. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Comillas.
- [24] Butleris, R. & Silingas, D. (2014). *Towards Customizing UML Tools for Enterprise Architecture Modeling*. Nomagic, Whitepaper.
- [25] Hodijah, A., Sundari, S., Nugraha C (2018). *Applying TOGAF for e-government implementation based on service oriented architecture methodology towards good government governance*. In 4th International Seminar of Mathematics, Science and Computer Science Education.



Sandra M. Hurtado G.<sup>1</sup>

Jessica Pimentel C.<sup>2</sup>

Gabriel E. Chanchí G.<sup>3</sup>

Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca  
Popayán – Colombia

Con el fin de permitir que los portales web sean diseñados acorde con las necesidades funcionales de los usuarios, el concepto de usabilidad ha cobrado gran importancia en los últimos años. En este sentido de acuerdo a la ISO 9241-11, la usabilidad se centra en el cumplimiento de los objetivos de un usuario con eficiencia eficacia y satisfacción. A nivel de la usabilidad en sitios web, existen un conjunto de métodos de inspección o evaluación, los cuales, a partir de un conjunto de heurísticas y criterios de usabilidad, permiten la identificación de problemas típicos de usabilidad. En este capítulo se propone un estudio comparativo sobre dos de los métodos de inspección de usabilidad más difundidos como son: el test heurístico de Torres-Burriel y el de Sirius. El objetivo del estudio de la identificación de ventajas y desventajas de la aplicación de estos métodos de inspección, de tal manera que se puedan determinar posibles líneas de investigación futuras que tengan en cuenta la retroalimentación e integración de estos dos métodos. Así mismo este trabajo pretende servir de guía para la conducción de inspecciones heurísticas de usabilidad web, a partir de los métodos considerados.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los portales web son actualmente la forma más sencilla y difundida que tienen las personas y empresas para dar a conocer información sobre un producto o servicio. En relación a lo anterior es necesario que estos sitios cumplan y estén acorde a lo que el usuario espera encontrar en ellos, de tal modo que se logre captar la atención del usuario sin dejar de un lado la idea principal para la cual se creó el sitio web. Es por lo anterior que el concepto de usabilidad ha tomado fuerza con el objetivo de que los usuarios puedan cumplir sus expectativas de uso de manera adecuada. De acuerdo al estándar ISO 9241-11, la usabilidad es entendida como: “el grado en el que un producto puede ser utilizado por usuarios específicos para conseguir objetivos específicos con efectividad, eficiencia y satisfacción en un determinado contexto de uso” [1]. Según lo anterior, la usabilidad de un sistema depende de los usuarios, de sus necesidades y del contexto específico de uso, razón por la cual no es atributo inherente al software, es decir no puede especificarse de manera independiente del entorno de uso y de los usuarios [2, 3].

De acuerdo a lo anterior, tanto las empresas del área software como los desarrolladores y los centros de formación, deben considerar la importancia de la usabilidad en el proceso de desarrollo, con el fin de garantizar el potencial éxito de las aplicaciones en el mercado. Esto, considerando que tradicionalmente, el área de la ingeniería de software se ha enfocado en atributos software, relacionados con el rendimiento y la fiabilidad de las aplicaciones. Lo anterior es consecuencia del desconocimiento por parte de algunas empresas en cuanto a las ventajas de vincular la usabilidad en el proceso de desarrollo de software, por lo que consideran esto como un costo adicional e innecesario [4]. Dentro de las ventajas y aportes de la usabilidad al desarrollo de software se pueden considerar: es un atributo fundamental en el desarrollo de aplicaciones interactivas, ya que permite tener un desarrollo competitivo dentro de la industria del software al considerar a las personas como parte esencial en el éxito o fracaso de un producto software; la usabilidad tiene medidas para poder evaluarla, principios de diseño para lograr productos más usables y métodos para practicarla [5]; permite el incremento en la productividad del usuario [6]; reduce los costos en desarrollo, capacitación y mantenimiento de las aplicaciones [6].

Existen varios métodos de inspección de usabilidad web dentro de los que se destacan el test heurístico de Sirius [7] y el test de Torres-Burriel [8], los cuales a partir de la definición de heurísticas y criterios de usabilidad permiten la identificación de problemas comunes de usabilidad en diferentes tipos de sitios web [9]. Las heurísticas definidas para sitios web en los dos métodos de inspección mencionados, parten de los principios de propósito general de Nielsen y los especifican al contexto de los sitios web. Estos dos métodos definen una escala de valoración diferente para cada uno de los criterios de evaluación considerados, permitiendo obtener estadísticas manuales (Torres-Burriel) o automáticas (Sirius) sobre el cumplimiento de las diferentes heurísticas en sitios web. La importancia de la ejecución de estos métodos de evaluación radica en la obtención de recomendaciones sobre el portal web evaluado, permitiendo retroalimentar la calidad del producto software. En este artículo se propone un estudio comparativo sobre dos métodos de inspección de usabilidad para sitios web mencionados. Mediante estudio se pretende identificar las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos, así como delinear posibles líneas de investigación futuras que tengan en cuenta la retroalimentación e integración de estos dos métodos. Este trabajo pretende servir de guía en cuanto a la escogencia del método adecuado y a la realización de inspecciones de usabilidad sobre sitios web.

---

<sup>1</sup> sandrahurtado@unimayor.edu.co

<sup>2</sup> jessica.pimentel@unimayor.edu.co

<sup>3</sup> gchanchi@unimayor.edu.co

El resto del capítulo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se propone el marco conceptual considerado en la presente investigación. En la sección 3 se describe la metodología considerada para el presente estudio. En la sección 4 se presenta el caso de estudio sobre el que se aplicaron los dos métodos de evaluación de usabilidad considerados en este trabajo. En la sección 5 se muestra la discusión sobre la comparación de los dos métodos de evaluación de usabilidad considerando los métodos de Sirius y Torres-Burriel. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y trabajos futuros derivados de la presente investigación.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

En este apartado se presentan los conceptos más importantes que se consideraron en el desarrollo del presente capítulo. Dentro de ellos se encuentran: Principios heurísticos de Nielsen, Test de usabilidad de Torres Burriel, Test de usabilidad de Sirius.

### 2.1 Principios heurísticos de Nielsen

Jacob Nielsen (considerado como el padre de la usabilidad) propone un conjunto de 10 heurísticas para la evaluación de aplicaciones de propósito general desde la perspectiva de usabilidad (ver Tabla 1). Estas heurísticas, son consideradas como recomendaciones que permiten verificar diferentes elementos críticos en la interfaz de usuario [10]. Según [11] estas heurísticas han tenido un impacto significativo en las etapas de diseño y evaluación del proceso de desarrollo de software. Su importancia radica en que han servido de base para la creación de heurísticas en diferentes tipos de aplicaciones (videojuegos, entornos de televisión, entornos móviles, etc.).

**Tabla 1.** Heurísticas de Nielsen

Definición	Descripción
H1. Visibilidad del sistema	El sistema debe mantener siempre informado al usuario sobre lo que está ocurriendo, a través de retroalimentación dentro de un tiempo razonable.
H2. Coincidencia entre el sistema y el mundo real	El sistema debería “hablar” el idioma del usuario, con palabras, frases y conceptos familiares, más que términos orientados al sistema. Seguir convenciones, de modo que la información parezca lógica y natural.
H3. Control y libertad del usuario	Los usuarios eligen a veces funciones del sistema por error, y necesitarán una salida de emergencia, con opciones de deshacer y rehacer.
H5. Consistencia y estándares	Los usuarios no deberían preguntarse si diferentes palabras, situaciones o acciones significan lo mismo. Se deben seguir las convenciones de la plataforma.
H6. Prevención de errores	Mucho más adecuado que mostrar mensajes de error entendibles, es un diseño cuidadoso que evite la ocurrencia de problemas. Se deben eliminar estas situaciones presentando una opción de confirmación a los usuarios antes de que realicen la acción.
H7. Reconocimiento más que recuerdo	Minimizar la carga de memoria de los usuarios mediante el uso de objetivos, acciones y opciones visibles. El usuario no debería recordar información de una parte del sistema a otra.
H8. Flexibilidad y eficacia del uso	Elementos aceleradores que pasan desapercibidos para los usuarios novatos, pero que deben agilizar la interacción con el sistema a los usuarios expertos. Debe facilitar a los usuarios la ejecución de acciones frecuentes.
H9. Diseño estético y minimalista	El sistema no debe mostrar información que sea poco relevante o que raramente sea utilizada por el usuario.
H10. Ayuda al usuario para reconocer, diagnosticar y recuperarse de errores	Los mensajes de error deben estar expresados en un lenguaje natural entendible a los usuarios (no en código o lenguaje máquina). Estos deben indicar de manera precisa el problema y sugerir una solución de forma constructiva.
10. Ayuda y documentación	Cualquier tipo de información debe ser fácil de buscar y estar centrado en la tarea del usuario. Las instrucciones deben consistir en una lista concreta no muy extensa de tareas a realizar.

### 2.2 Test de usabilidad de Torres Burriel

Torres-Burriel propone un conjunto de heurísticas para la evaluación de sitios web, las cuales contienen los aspectos más relevantes a tener en cuenta a nivel de usabilidad, en donde por cada heurística presentada se proporciona un conjunto de criterios a evaluar en un rango de 1 a 5 expresados en términos de preguntas [8]. Dichas heurísticas retoman algunos de los elementos planteados en las heurísticas de Nielsen, los cuales se distribuyen en un total de 11 heurísticas, enfocadas a la evaluación de sitios web (ver Tabla 2).

### 2.3 Test de usabilidad de Sirius

En [7], se presenta un sistema de evaluación de usabilidad denominado SIRIUS, diseñado para ser usado en sitios web, el cual incluye características que lo distinguen de las propuestas nombradas anteriormente. El método de evaluación consiste en 10 heurísticas de usabilidad que contienen un conjunto de criterios asociados, los cuales se encuentran disponibles para ser evaluados en un rango numérico de 0 a 10 y en un rango cualitativo. Además, al término de la prueba el sistema proporciona como valor final un porcentaje de usabilidad del portal evaluado. Este cálculo depende del sitio web sobre el cual se esté realizando la evaluación, ya que en esta propuesta se establece una relevancia en las heurísticas y los criterios de las mismas, en función de los diferentes tipos de sitios web considerados (ver tabla 3). Tal como se aprecia en la Tabla 3, el sistema de evaluación SIRIUS recoge la mayoría de las heurísticas planteadas por Torres-Burriel, a excepción de la heurística de “Accesibilidad” (H10). Del mismo modo en el sistema SIRIUS la heurística “Lenguaje y redacción” de Torres-Burriel, recibe el nombre de “Entendibilidad y facilidad”.

**Tabla 2. Heurísticas de Torres Burriel**

Definición	Descripción
H1. Aspectos generales	Aspectos relacionados con los objetivos del sitio web, la correcta y fácil recordación de las URL tanto externas como internas, la adecuada organización y estructura de los contenidos además de la utilización de un lenguaje claro, conciso y familiar al usuario
H2. Identidad e información	Evalúa aspectos relacionados con la identidad del sitio, así como también los mecanismos para ponerse en contacto con la empresa, la protección de datos de carácter personal y autoría de los contenidos.
H3. Lenguaje y redacción	Hace referencia a si el sitio web habla el mismo lenguaje del usuario.
H4. Rotulado	Expresa elementos relacionados con el significado, adecuado uso y familiaridad de los rótulos de los contenidos.
H5. Estructura y navegación	Elementos referentes a la adecuada organización, disposición y estructuración de la información además de la navegación del sitio.
H6. Layout de la página	Aspectos relacionados con la distribución y la apariencia de los elementos de navegación y contenidos en la interfaz.
H7. Búsqueda	Evalúa aspectos referentes con el sistema de búsqueda implementada en el sitio web, relacionados a la facilidad de acceso, así como también elementos relacionados con la efectividad de las búsquedas.
H8. Elementos multimedia	Aspectos relacionados con el nivel de adecuación de los contenidos multimedia del portal web.
H9. Ayuda	Aspectos relacionados con la ayuda disponible para el usuario durante su navegación por el sitio.
H10. Accesibilidad	Aspectos relacionados con la facilidad de utilización de las páginas web por parte de cualquier usuario, en la que se evalúan elementos respecto al tamaño, tipo y color de fuente, peso de la página, compatibilidad con los diferentes navegadores y elementos que permitan navegar de forma cómoda.
H11. Control y retroalimentación	Aspectos relacionados con la libertad del usuario para deshacer o rehacer acciones en la navegación, así como también la oportuna y clara información brindada al mismo en la interacción con el portal web.

**Tabla 3. Heurísticas del sistema SIRIUS**

Heurística	Criterios a evaluar
H1. Aspectos generales	AG1: Objetivos del sitio web concretos y bien definidos. AG2: Contenidos y servicios ofrecidos precisos y completos. AG3: Estructura general del sitio web orientada al usuario. AG4: Look & Feel general se corresponde con los objetivos, características, contenidos y servicios del sitio web. AG5: Diseño general del sitio web reconocible. AG6: Diseño general del sitio web coherente. AG7: Se utiliza el idioma del usuario. AG8: Se da soporte a otro/s idioma/s. AG9: Traducción del sitio completa y correcta. AG10: Sitio web actualizado periódicamente.
H2. Identidad e información	II.1: Identidad o logotipo significativo, identificable y suficientemente visible. II.2: Identidad del sitio en todas las páginas. II.3: Eslogan o tagline adecuado al objetivo del sitio. II.4: Se ofrece información sobre el sitio web, empresa. II.5: Existen mecanismos de contacto. II.6: Se ofrece información sobre la protección de datos de carácter personal o los derechos de autor de los contenidos del sitio web. II.7: Se ofrece información sobre el autor, fuentes y fechas de creación y revisión en artículos, noticias, informes".
H3. Estructura y navegación	EN.1: Se ha evitado pantalla de bienvenida. EN.2: Estructura de organización y navegación adecuada. EN.3: Organización de elementos consistente con las convenciones. EN.4: Control del número de elementos y de términos por elemento en los menús de navegación. EN.5: Equilibrio entre profundidad y anchura en el caso de estructura jerárquica. EN.6: Enlaces fácilmente reconocibles como tales. EN.7: La caracterización de los enlaces indica su estado (visitado, activo). EN.8: No hay redundancia de enlaces. EN.9: No hay enlaces rotos. EN.10: No hay enlaces que lleven a la misma página que se está visualizando. EN.11: En las imágenes de enlace se indica el contenido al que se va a acceder. EN.12: Existe un enlace para volver al inicio en cada página. EN.13: Existen elementos de navegación que orienten al usuario acerca de dónde está y cómo deshacer su navegación (ej.: migas). EN.14: Existe mapa del sitio para acceder directamente a los contenidos sin navegar.
H4. Rotulado	RO.1: Rótulos significativos. RO.2: Sistema de rotulado controlado y preciso. RO.3: Título de las páginas, correcto y planificado. RO.4: URL página principal correcta, clara y fácil de recordar. RO.5: URLs de páginas internas claras. RO.6: URLs de páginas internas permanentes.
H5. Layout de la página	LA.1: Se aprovechan las zonas de alta jerarquía informativa de la página para contenidos de mayor relevancia. LA.2: Se ha evitado la sobrecarga informativa. LA.3: Es una interfaz limpia, sin ruido visual. LA.4: Existen zonas en blanco entre los objetos informativos de la página para poder descansar la vista. LA.5: Uso correcto del espacio visual de la página. LA.6: Se utiliza correctamente la jerarquía visual para expresar las relaciones del tipo "parte de" entre los elementos de la página. LA.7: Se ha controlado la longitud de página. LA.8: La versión impresa de la página es correcta. LA.9: El texto de la página se lee sin dificultad. LA.10: Se ha evitado el texto parpadeante / deslizante.
H6. Entendibilidad y facilidad	EF.1: Se emplea un lenguaje claro y conciso. EF.2: Lenguaje amigable, familiar y cercano. EF.3: Cada párrafo expresa una idea. EF.4: Uso consistente de los controles de la interfaz. EF.5: Metáforas visuales reconocibles y comprensibles por cualquier usuario (ej.: iconos). EF.6: Si se usan menús desplegados, orden coherente o alfabético. EF.7: Si el usuario tiene que rellenar un campo, las opciones disponibles se pueden seleccionar en vez de tener que escribirlas.
H7. Control y retroalimentación	CR.1: El usuario tiene todo el control sobre la interfaz. CR.2: Se informa al usuario acerca de lo que está pasando. CR.3: Se informa al usuario de lo que ha pasado. CR.4: Existen sistemas de validación antes de que el usuario envíe información para tratar de evitar errores. CR.5: Cuando se produce un error, se informa de forma clara y no alarmista al usuario de lo ocurrido y de cómo solucionar el problema. CR.6: Se ha controlado el tiempo de respuesta. CR.7: Se ha evitado que las ventanas del sitio anulen o se superpongan a la del navegador. CR.8: Se ha evitado la proliferación de ventanas en la pantalla del usuario. CR.9: Se ha evitado la descarga por parte del usuario de plugins adicionales. CR.10: Si existen tareas de varios pasos, se indica al usuario en cual está y cuantos faltan para completar la tarea.
H8. Elementos multimedia	EM.1: Fotografías bien recortadas. EM.2: Fotografías comprensibles. EM.3: Fotografías con correcta resolución. EM.4: El uso de imágenes o animaciones proporciona algún tipo de valor añadido. EM.5: Se ha evitado el uso de animaciones cíclicas. EM.6: El uso de sonido proporciona algún tipo de valor añadido.
H10. Búsqueda	BU.1: La búsqueda, si es necesaria, se encuentra accesible desde todas las páginas del sitio. BU.2: Es fácilmente reconocible como tal. BU.3: Se encuentra fácilmente accesible. BU.4: La caja de texto es lo suficientemente ancha. BU.5: Sistema de búsqueda simple y claro. BU.6: Permite la búsqueda avanzada. BU.7: Muestra los resultados de la búsqueda de forma comprensible para el usuario. BU.8: Asiste al usuario en caso de no poder ofrecer resultados para una consultada dada.
H11. Ayuda	AY.1: El enlace a la sección de Ayuda está colocado en una zona visible y estándar. AY.2: Fácil acceso y retorno al/del sistema de ayuda. AY.3: Se ofrece ayuda contextual en tareas complejas. AY.4: FAQs (si las hay) correcta la elección como la redacción de las preguntas. AY.5: FAQs (si las hay) correcta la redacción de las respuestas.

### 3. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron 5 fases. En primera instancia se identificó el sitio web sobre el cual se desarrolló la evaluación, posteriormente se realizó la valoración de los criterios establecidos en los test heurísticos de Torres Burriel y Sirius en el sitio web escogido, para luego identificar un conjunto de problemas asociados a las heurísticas junto con la generación de un listado de recomendaciones por cada criterio y finalmente se realiza la comparación de los métodos utilizados en la evaluación. En la Figura 1 se detalla la metodología.



Figura 1. Metodología propuesta

### 4. CASO DE ESTUDIO

A modo de caso de estudio, en el presente trabajo se realizó la evaluación del sitio web de la “Secretaría de Educación del Cauca” a través de las heurísticas propuestas en el test de usabilidad de Torres Burriel y Sirius, esto haciendo uso de la técnica de Focus Group que consiste en la realización de entrevistas grupales guiadas por un moderador, el cual propone un tema de discusión que es debatido de forma colectiva a fin de recolectar información necesaria para una investigación. Dicha técnica estuvo dirigida en torno a verificar el cumplimiento de los criterios establecidos en los test de usabilidad mencionados. A continuación, se presenta un conjunto de problemas identificados, recomendaciones asociadas a los criterios evaluados por cada sistema de evaluación y finalmente la comparación entre los mismos de acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación.

Tabla 4. Problemas evidenciados con el test de Torres-Burriel

Heurística	Problema
H1. Aspectos generales	<ul style="list-style-type: none"> <li>En la página web no se permite adecuar características como el tamaño del texto y ajustes de color de acuerdo a las capacidades visuales del usuario. No se conserva la misma paleta de colores en algunas páginas del sitio web y los títulos de encabezados en algunas de las vistas no es consistente con los demás</li> <li>No se conserva la misma paleta de colores en algunas páginas del sitio web y los títulos de encabezados en algunas de las vistas no es consistente con los demás</li> </ul>
H2. Identidad e información	<ul style="list-style-type: none"> <li>En algunas secciones como “Encuesta satisfacción del servicio” y “Actualizar datos” entre otras, se pierde la consistencia del sitio (menú principal) y los colores distintivos del sitio web.</li> <li>El sitio web no cuenta con un logotipo distinguible y fácilmente identificable.</li> <li>En los formularios del sitio web no se indica al usuario sobre el tratamiento que se le dará a la información que está suministrando</li> </ul>
H4. Rotulado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los títulos de encabezados en algunas de las vistas no son consistentes con los que se presentan en las demás.</li> <li>Los enlaces del sitio web siempre permanecen del mismo color y tamaño aun cuando la sección ya ha sido visitada por el usuario.</li> </ul>
H5. Estructura y navegación	<ul style="list-style-type: none"> <li>El menú de navegación de “Dependencias” se encuentra saturado de términos.</li> <li>El sitio web no mantiene el camino o miga de pan en algunas páginas u opciones a las que se ingresa como son las opciones de “Gestión de Calidad”.</li> <li>El sitio web no incluye el atributo ‘title’ en ninguna de sus imágenes.</li> </ul>
H6. Layout de la página	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las imágenes de banner presentadas en las páginas principales ocupan gran cantidad de espacio y poco contenido informativo.</li> <li>En la mayoría de las páginas internas del sitio web se evidencia gran cantidad de texto.</li> <li>En algunas opciones o páginas del portal web no existe un control de la cantidad y orden en que se muestra tanto los textos como las imágenes.</li> <li>En la mayoría de las páginas hay sobresaturación de elementos, mientras que en la opción de video en la sección de multimedia se observa un gran espacio en blanco que indica falta de contenido.</li> <li>El portal web no es adaptable a diferentes dispositivos.</li> <li>Algunos elementos del portal ocupan todo el ancho de la página.</li> </ul>
H7. Búsqueda	<ul style="list-style-type: none"> <li>El campo de búsqueda dentro del portal web no es lo suficientemente ancho.</li> <li>El sitio web no cuenta con la opción o sección de ayuda en ninguna de las páginas.</li> </ul>
H8. Elementos multimedia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algunas fotografías de la sección de imágenes del portal web no se muestran completamente y otras tienen una baja resolución.</li> </ul>
H9. Ayuda	<ul style="list-style-type: none"> <li>El sitio web no cuenta con la opción o sección de ayuda en ninguna de las páginas.</li> <li>El sitio web no dispone de ayuda contextual para las principales funcionalidades de la misma.</li> </ul>
H10. Accesibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>En el sitio web los textos cuentan con poco ancho de línea entre cada renglón de los textos.</li> <li>Ninguna de las imágenes incluye el atributo “alt” por lo que, si por alguna razón el usuario no pudiera verlas, no tendría idea de lo que describen.</li> <li>El sitio web tarda mucho tiempo en cargar en relación a otros sitios con la misma temática.</li> </ul>
H11. Control y retroalimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algunas de las opciones de la sección: “Nuestra Entidad” del menú principal no muestran donde se encuentra actualmente el usuario.</li> </ul>

#### 4.1 Evaluación según test heurístico de Torres-Burriel

De acuerdo a los principios establecidos en el test de usabilidad de Torres Burriel, en la Tabla 4 se presenta el conjunto de problemas identificados en el sitio web de la “Secretaría de Educación del Cauca”, los cuales han sido clasificados

por la heurística a la que pertenecen, junto con una sugerencia asociada, mientras que en la Tabla 5 se muestra a modo de conclusión el promedio de valores dados en cada heurística por el grupo de trabajo. De igual modo en la Tabla 5 se presentan las calificaciones promedio realizadas por el equipo evaluador sobre las diferentes heurísticas de Torres-Burriel.

**Tabla 5.** Calificaciones obtenidas mediante Torres-Burriel

Definición	Descripción
H1. Aspectos generales	4
H2. Identidad e información	4
H3. Lenguaje y redacción	4
H4. Rotulado	4
H5. Estructura y navegación	3
H6. Layout de la página	3
H7. Búsqueda	4
H8. Elementos multimedia	4
H9. Ayuda	1
H10. Accesibilidad	4
H11. Control y retroalimentación	4

A partir de la evaluación realizada sobre la página de la “Secretaría de Educación del Cauca”, se pudo evidenciar que las heurísticas en las que mayores problemas son: H5: “Estructura y navegación”, H6: “Layout de la página” y H9: “Ayuda”. Respecto a H5 los criterios que más tienen problemas son los relacionados con la caracterización de los enlaces, el control del número de elementos por menú y la orientación del usuario acerca de donde se encuentra. En lo que se refiere a H6 se evidenció sobrecarga informativa en la mayoría de las páginas internas del sitio web, así como también un mal manejo del espacio visual y longitud de la página. Finalmente, con respecto a H9 el portal no cuenta con una sección de ayuda para la realización de tareas complejas.

#### 4.2 Evaluación según test heurístico de Sirius

A continuación, en la Tabla 6 se presenta el conjunto de problemas relevantes identificados en el sitio web de la “Secretaría de Educación del Cauca” desde el test de Sirius, los cuales se muestran clasificados por la heurística a la que pertenecen.

**Tabla 6.** Heurísticas del sistema SIRIUS

Heurística	Problemas por criterio
H1. Aspectos generales	AG3: En el portal no se permite adecuar el tamaño del texto y los ajustes de color de acuerdo a las capacidades visuales del usuario. AG6: No se conserva la misma paleta de colores en algunas páginas del sitio web y los títulos de encabezados en algunas de las vistas no son consistentes con los demás. AG8: El portal web no cuenta con la opción de traducción a otros idiomas.
H2. Identidad e información	II.1: El sitio web no cuenta con un logotipo identificable. II.2: En algunas páginas como: “Encuesta satisfacción del servicio” y “Actualizar datos” entre otras, no se mantiene la consistencia del sitio (menú principal) y los colores distintivos. II.6: En los formularios del sitio web no se indica al usuario sobre el tratamiento que se le dará a la información que está suministrando.
H3. Estructura y navegación	EN.4: El menú de navegación de “Dependencias” se encuentra saturado de términos. EN.7: Los enlaces del sitio permanecen del mismo color y tamaño aun cuando la sección ya ha sido visitada por el usuario. EN.9: El contenido de las páginas de “Red de Actores” y “Plan Nacional de Lectura y Escritura” no está disponible. EN.12: El portal web no permite volver al inicio cuando se está dentro de algunas opciones como la de “Encuesta Satisfacción del Servicio”. EN.13: El sitio web no mantiene el camino o miga de pan en algunas páginas u opciones a las que se ingresa como son las opciones de “Gestión de Calidad”. EN.14: El portal web no cuenta con un mapa del sitio.
H4. Rotulado	RO.3: Los títulos de encabezado en algunas de las vistas no es consistente con los que se presentan en otras opciones. RO.5: La URL de la página de “Actualizar datos” no es fácilmente reconocible por el usuario.
H5. Layout de la página	LA.1: Las imágenes de banner presentadas en las páginas principales ocupan gran cantidad de espacio y poco contenido informativo. LA.2: En la mayoría de las páginas internas del sitio web se evidencia gran cantidad de texto y poco espacio entre líneas. LA.3: En algunas opciones o páginas del portal web no existe un control de la cantidad y orden en que se muestra tanto los textos como las imágenes. LA.4: En la mayoría de las páginas hay sobresaturación de elementos, mientras que en la opción de video en la sección de multimedia se observa un gran espacio en blanco que indica falta de contenido. LA.5: El portal web no es adaptable a diferentes dispositivos. LA.6: Se utiliza correctamente la jerarquía visual para expresar las relaciones del tipo “parte de” entre los elementos de la página. LA.7: El portal web en algunas páginas u opciones ocupan todo el ancho de la página.
H6. Entendibilidad y facilidad	EF.6: Los elementos de los menús desplegables no aparecen en orden alfabético. EF.7: Si el usuario tiene que rellenar un campo, las opciones disponibles se pueden seleccionar en vez de tener que escribirlas.
H7. Control y retroalimentación	CR.2: En algunas de las opciones de “Nuestra Entidad” del menú principal no se muestra donde se encuentra actualmente el usuario. CR.4: Los formularios dentro del portal no cuentan con una correcta validación de datos.
H8. Elementos multimedia	EM.1: Algunas fotografías de la sección de imágenes del portal web no se muestran completamente. EM.3: El portal web presenta dentro de algunas opciones o páginas internas imágenes con baja calidad y/o resolución.
H10. Búsqueda	BU.1: En algunas páginas como “Encuesta satisfacción del servicio” y “Unidad de atención del ciudadano” se pierde el campo de búsqueda. BU.4: El campo de búsqueda dentro del portal web no es lo suficientemente ancho.
H11. Ayuda	AY.1: El sitio web no cuenta con la opción o sección de ayuda en ninguna de las páginas. AY.3: El sitio web no dispone de ayuda contextual para las principales funcionalidades de la misma.

Finalizada la evaluación, el portal alcanzó un porcentaje de usabilidad del 73.75%, valor obtenido, a partir de las calificaciones dadas a los criterios establecidos por cada heurística de Sirius y su respectiva relevancia de acuerdo al tipo de página web. En este caso se consideró el portal de la Secretaria de Educación del Cauca dentro de la categoría de “Administración Publica/Institucional”.

Las heurísticas que obtuvieron en promedio una calificación baja (en la escala de 1 a 10) en sus criterios respecto a las demás y que por lo tanto se consideran problemáticas fueron: “AG: Aspectos Generales”, “EN: Estructura y Navegación”, “LA: Layout de la Página” y “AY: Ayuda”. Las 3 primeras heurísticas obtuvieron calificaciones con promedio de 6, mientras que la heurística de “Ayuda” fue la de menor valoración al obtener en promedio calificaciones de 3 en sus criterios. Respecto a AG, esta presenta problemas en la facilidad de interacción del usuario con el sitio web, y el soporte a otros idiomas. Así mismo, en lo que se refiere a EN, se observó la falta de control en el número de elementos por menú, además problemas en la caracterización de los enlaces que permitan al usuario identificar si estos ya han sido visitados o no y la inexistencia de un mapa del sitio para acceder directamente a los contenidos. En relación a LA, los aspectos en los que más inconvenientes tiene el portal están asociados con el aprovechamiento de las zonas de alta jerarquía para contenidos de mayor relevancia, el mal uso de los espacios y organización de la información al presentarse gran cantidad de contenido en espacios reducidos. Finalmente, respecto a AY, el sitio web no cuenta con una sección de ayuda que permita guiar al usuario en tareas complejas.

Basándose en la relevancia caracterizada en Sirius para cada heurística de acuerdo al tipo de portal evaluado, se puede concluir que los principios en los que la página web presenta mayores deficiencias de usabilidad son: “AG: Aspectos Generales” y “LA: Layout de la Página”, heurísticas que según Sirius tienen una relevancia “Muy Alta” para páginas web de carácter “Administración Publica/Institucional” al igual que la heurística de “EN: Estructura y Navegación”, la cual presenta una relevancia “Alta” para el tipo de sitio web indicado. Así mismo, aun cuando se mencionaron las dificultades de la heurística “AY: Ayuda”, el sistema no se le da un valor alto, dado que la relevancia para dicha heurística según el tipo de portal es “Media”.

## 5. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN

A continuación, en la Tabla 7, se presenta un resumen comparativo de las ventajas y desventajas de los métodos de evaluación estimados, las cuales fueron obtenidas a partir del caso de estudio realizado en el presente trabajo.

**Tabla 7.** Comparación entre los métodos de evaluación

<b>Sirius</b>	<b>Torres-Burriel</b>
Permite evaluar sitios web mediante la valoración de un conjunto de criterios asociados a cada heurística y que recogen los aspectos más relevantes a considerar en la usabilidad.	Permite evaluar sitios web mediante la valoración de un conjunto de criterios asociados a cada heurística y que recogen los aspectos más relevantes a considerar en la usabilidad.
Evaluación estimada en 10 heurísticas de Usabilidad.	Evaluación estimada en 11 heurísticas de usabilidad.
No son tenidos en cuenta criterios relacionados con accesibilidad en la evaluación.	Incluye criterios relacionados con accesibilidad en la evaluación.
La escala de calificación de cada criterio va de 0 a 10 o un valor cualitativo: NA, NTS, NEP, NPP, NPI y S que indica el nivel de cumplimiento del criterio en las vistas de la página, aunque internamente para efectos de cómputo también se les ha asignado un valor de 0 a 10.	Los criterios se evalúan en un rango de 1 a 5 en la cual 1 indica la mínima expresión de la heurística en el sitio web, mientras que 5 representa el total cumplimiento de la heurística en la página evaluada.
Permite determinar el nivel de usabilidad de un sitio web a través de una medida cuantitativa en el rango 0-100.	No proporciona ningún mecanismo para obtener un valor cuantitativo de la usabilidad del sitio web evaluado.
Puede ser aplicable a cualquier sitio web	Puede ser aplicables a cualquier sitio web.
Es un mecanismo fácil y rápido de aplicar teniendo en cuenta que los datos se generan automáticamente a partir de las valoraciones dadas a los criterios.	El cálculo de promedios y demás datos debe realizarse de forma manual
Establece una relevancia para cada una de las heurísticas y criterios dependiendo del tipo de sitio web a evaluar.	Todas las heurísticas y criterios tienen la misma relevancia.

A partir de la información presentada en la tabla 6 se puede concluir que el sistema de evaluación de usabilidad web Sirius es un instrumento más completo y preciso de análisis heurístico en comparación con la propuesta de Torres-Burriel, teniendo en cuenta que permite evaluar un portal web a través de la valoración de un conjunto de criterios asociados a una heurística, en el cual se recogen los aspectos relevantes a tener en cuenta en la usabilidad, además de considerar el tipo de sitio web para luego establecer una medida cuantitativa de usabilidad al término de la evaluación, características que lo diferencian del instrumento de Torres Burriel, el cual a pesar de proponer un conjunto de heurísticas completas y exhaustivas, no toma en consideración el tipo de sitio web sobre el que se realiza la evaluación, ni facilita la obtención de un valor cuantitativo tras la evaluación heurística, factores considerados como relevantes teniendo en cuenta que dependiendo del sitio al que se esté accediendo y a las necesidades del usuario, unas u otras tareas cobran mayor importancia y deben ser tenidas en cuenta en la evaluación. A pesar de lo anterior, el test heurístico de Torres-Burriel toma en consideración la heurística de accesibilidad, una temática que ha cobrado relevancia en los sitios web con el fin de permitir que un mayor número de personas puedan acceder a un sitio web, de manera independiente a sus limitaciones.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan dos métodos para evaluación de usabilidad en sitios web (Torres-Burriel y Sirius), los cuales permiten inspeccionar diferentes tipos de portales web, a partir de la revisión de un conjunto de heurísticas de usabilidad web. Estos métodos de evaluación de usabilidad complementan y particularizan las heurísticas de Nielsen al contexto de las aplicaciones web.

La principal ventaja de Sirius con respecto al método de Torres-Burriel es el uso de factores de relevancia para las diferentes heurísticas y criterios de usabilidad, dependiendo del tipo de sitio web a evaluar. Así mismo Sirius permite la estimación automática de un porcentaje de usabilidad, dependiendo de las valoraciones hechas por los evaluadores y los factores de relevancia del sitio. Una de las principales ventajas del test de Torres-Burriel es la consideración de la heurística de accesibilidad, elemento que se considera fundamental en los sitios web, con el fin de acercar a una mayor cantidad de público a un sitio web.

El caso de estudio considerado en este capítulo permitió evidenciar un conjunto de problemas obtenidos mediante la aplicación de los dos métodos de evaluación de usabilidad. Dado que el instrumento de Sirius puede considerarse más completo con respecto al de Torres Burriel, la aplicación de los dos métodos permitió evidenciar problemas complementarios en el área de la accesibilidad. En este sentido un trabajo futuro a considerar es la retroalimentación del método de Sirius, mediante la definición de criterios y relevancias desde la perspectiva de la accesibilidad.

## REFERENCIAS

- [1] Enriquez, J. & Casas, S. (2013). Usabilidad en aplicaciones móviles. *Revista de Informes Científicos Técnicos – UNPA* 5(2), 25-47.
- [2] Ferrari, S. & Mariño, S. (2014). Guía para la evaluación de usabilidad para herramientas de minería de datos. *Revista No solo usabilidad* 13.
- [3] Baeza, R., Rivera, C. & Velasco, J. (2014). Arquitectura de la información y usabilidad en la web. *Revista el Profesional de la Información* 13(3), 168-178.
- [4] Sanchez, W (2011). La usabilidad en Ingeniería de Software: definición y características. *Revista Ing-novación* 2, 7-21.
- [5] Paz, M, (2012). Accesibilidad y Usabilidad: los requisitos para la inclusión digital. En VII Jornadas de Sociología de la Universidad Nacional de la Plata.
- [6] Sedin, M., Rodriguez, J. & Cuadrat, S. (2012). Método para Tests de Usabilidad Cuantitativos basado en Técnicas de Eye-Tracking. Trabajo de fin de Master en Interacción Persona Ordenador. Universidad de Lleida, España.
- [7] Suarez, M., Cueva, J. & Martinez, A. SIRIUS: Sistema de Evaluación de la Usabilidad Web Orientado al Usuario y basado en la Determinación de Tareas Críticas. Trabajo de Doctorado. Universidad de Oviedo, España.
- [8] Torres-Burriel, D. Plantilla para Hacer Análisis Heurísticos de Usabilidad. TorresBurriel Studio.
- [9] Fernandez, A., Insfran, E. & Abrahao, S. (2011). Usability evaluation methods for the web: A systematic mapping study. *Revista Information and Software Technology* 53(8), 789-817.
- [10] Nielsen, J. (sf). 10 Usability Heuristics For User Interface Design. Nielsen Norman Group.
- [11] Cronholm, S. (2009). The usability of usability guidelines: a proposal for meta-guidelines. En 21 Conferencia del Grupo Australiano de Interés en Interacción Persona Computador.
- [12] Canals, A. (2002). ¿Quo vadis, KM ? La complejidad como nuevo paradigma para la gestión del conocimiento. Documento de trabajo. Universidad Abierta de Cataluña.
- [13] Viedma, J. (2000). La gestión del conocimiento y del capital intelectual. Fundación Iberoamericana del Conocimiento.
- [14] Ordóñez, P. & Parreño, J. (2005). Aprendizaje organizativo y gestión del conocimiento: un análisis dinámico del conocimiento de la empresa. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 11(1), 165-177.
- [15] Davenport, T. & Klahr, P. (1998). Managing customer support knowledge. *California Management Review* 40(3), 195-208.
- [16] Pereira, H. (2011). Implementación de la Gestión del Conocimiento en la empresa. *Éxito Empresarial* 135, 1-6.
- [17] Saint, H. (1996). Tacit knowledge the key to the strategic alignment of intellectual capital. *Planning Review* 24(2), 10-16.
- [18] Sarvary, M. (1999). Knowledge management and competition in the consulting industry. *California Management Review* 41(2), 95-107.
- [19] Drucker, P., Argyris, C. & Brown, J. (2003). *Harvard business review: Gestión del Conocimiento*. Bilbao: Ediciones Deusto.
- [20] Dutta, S. & DeMeyer, A. (2001). Knowledge management at Arthur Andersen (Denmark): Building assets in real time and virtual space. In Malhotra, Y. (Ed.), *Knowledge management and business model innovation* (pp. 384-401). IGI Publishing.



El presente estudio muestra los resultados, al exponer 50 probetas de acero de las mismas características físicas a la intemperie durante diferentes periodos de tiempo, para luego someterlas a tracción hasta su punto de colapso mecánico, comparando los resultados obtenidos. De acuerdo con los resultados se encontró variación en la capacidad de soporte máxima entre probetas de diferente tiempo de exposición, encontrándose una variación decreciente en la carga máxima a tensión en el material, en función del tiempo de exposición a la intemperie. Estas variaciones mecánicas se deben al tiempo de exposición a la intemperie para las diferentes probetas y condiciones ambientales tales como: humedad relativa, variación en la temperatura y agentes químicos en el ambiente, por lo cual estos constituyen en variables que conllevan al deterioro del acero.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales con mayor durabilidad fabricados por el hombre [1], actualmente se encuentran estructuras fabricadas por este material, las cuales tienen más de un centenar de años y se encuentran en excelente estado, [2], en cambio el acero, a pesar de ser uno de los materiales más resistentes creados por el hombre, es un material que debido a sus componentes, su durabilidad no es tan amplia como la del concreto; debido a su alta capacidad de oxidarse, la cual aumenta su probabilidad al ser expuesto al medio ambiente [3], por lo cual la combinación de estos importantes materiales constructivos con lleva al tener un material de alta resistencia, con una muy buena durabilidad.

Por lo tanto, si se realizan malas prácticas constructivas en elementos fabricados de concreto reforzado, el acero se oxidará rápidamente, incluso antes de construir el elemento final, esto sucede por ejemplo cuando el acero que será empleado como refuerzo del concreto se almacena de manera inadecuada, o la exposición directa al medio ambiente de algunas partes del acero embebido en el concreto por falencias en el recubrimiento del mismo; esto con el tiempo conllevará a variaciones de la resistencia mecánicas del acero [4] y a su vez del concreto reforzado. En el siguiente capítulo se realiza pruebas de caracterización mecánica de barras de acero  $\frac{3}{4}$ " (empleadas mayoritariamente en estructuras de concreto reforzado), a diferentes tiempos de exposición a la intemperie concluyendo frente a su comportamiento mecánico y las implicaciones de usarlo con alto grado de oxidación.

## 2. GESTIÓN DE CONOCIMIENTO

El concreto es una mezcla de agregados finos y gruesos unidos a través de pasta de agua y cemento [5]; al interior de la mezcla de concreto también se aloja aire ocluido y/o incluido. El complemento de esta mezcla con aditivos puede dotarla de características especiales como: modificaciones en el tiempo de fraguado, ductilidad y durabilidad; que en ausencia de estos no se conseguirían sin alterar sus propiedades mecánicas. El concreto reúne una variedad de bondades que lo hacen un excelente material de construcción; en estado fresco permite la generación de diferentes formas al ser vaciado en moldes; según Nilson el concreto presenta buena resistencia al fuego y al clima, y puede proveer un amplio rango de propiedades al modificarse [6], de manera calculada, las proporciones de sus componentes en la mezcla, y aún más amplio, si en su elaboración se incluyen agregados y cementos especiales, o el uso de aditivos o metodologías especiales de curado.

Quizás la característica más notable del concreto endurecido es su excelente comportamiento mecánico de resistencia a la compresión, análoga al de una piedra natural [7]. Comparativamente a su buena resistencia a la compresión, el concreto es un material de bajas prestaciones frente a los esfuerzos que sean distribuidos entre la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos. Esta condición se subsana al combinarlo con acero de refuerzo.

El acero es un material que presenta un excelente desempeño ante esfuerzos de tensión y al ser integrado en el concreto, se configura el concreto reforzado el cual reúne beneficios de ambos materiales en un producto de mejores cualidades. Mientras el acero aporta sus cualidades frente a exigencias de tensión, el concreto hace lo propio frente a la compresión, a la vez que provee un recubrimiento al acero, librándolo de la corrosión y por ende preservando sus propiedades mecánicas. Las ventajas del concreto reforzado como señalan MacCormac y Brown son: 1. Buena resistencia a la compresión por unidad de costo frente a otros materiales, 2. Gran resistencia al fuego y el agua, 3. Rigidez, 4. Demanda de mantenimiento mínima, 5. Mayor longevidad de servicio, 6. Bajo costo, 7. Versatilidad en cuanto al amplio rango de formas que permite producir, 8. Fácil y extendido acceso a los agregados para su

<sup>1</sup> miguel.ospina@unimilitar.edu.co

<sup>2</sup> carlos.gaviria@unimilitar.edu.co

<sup>3</sup> d7302263@unimilitar.edu.co

elaboración, y 9. Baja exigencia de mano de obra calificada frente a otros materiales [5]. Estas ventajas señaladas por estos autores contrastan con algunas desventajas señaladas por los mismos como: 1) El costo derivado del requerimiento del uso de cimbras o formaletas hasta tanto el concreto no alcanza una resistencia determinada, 2) El gran peso muerto, derivado de su baja resistencia a la flexión por unidad de peso y volumen; más crítico a mayores luces entre apoyo, y 3) La variabilidad en sus propiedades, derivada de la falta de rigurosidad en el control de procedimientos de mezclado, colocado y curado.

Asumiendo una calidad adecuada en los constituyentes del concreto, este, como señala Nilson [6] adquiere y conserva las propiedades que lo catalogan como el material de construcción universal, con base en tres ítems: 1) Las proporciones adecuadas de las mezclas, 2) El cuidado en el procedimiento de mezclado de sus constituyentes, y 3) El vaciado y curado del concreto. No solamente la obtención de sus propiedades mecánicas se gesta de la correcta ejecución de los procedimientos señalados. Una práctica incorrecta en estos procesos, como lo señalan MacCormac y Brown entre las desventajas del concreto, suscita resultados adversos a las propiedades esperadas en el concreto y compromete su durabilidad [5].

La durabilidad del concreto en palabras de Sánchez es un parámetro que en determinado momento puede ser más importante que la resistencia misma del concreto y está relacionada con el deterioro que puede sufrir por causas químicas, mecánicas o físicas derivadas de su exposición al medio ambiente [8]. Por lo cual, el comité ACI-201 en el documento "guía para la durabilidad del concreto", señala la durabilidad del concreto hidráulico como aquella capacidad de resistir el deterioro producido por la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso que reduzca sus propiedades [9]. Según este documento un concreto duradero es aquel que conserva su forma, calidad y funcionalidad en el tiempo [10]. Siguiendo este mismo documento, el capítulo 4 enfatiza la necesidad de preservar la armadura de acero de la corrosión en concretos reforzados para garantizar la longevidad de los elementos construidos.

El concreto además de proveer capacidad de resistir esfuerzos de compresión al concreto armado, brinda una cobertura de protección al acero de refuerzo, preservando su integridad y por consiguiente sus características mecánicas de resistencia a la tracción. La alta alcalinidad de la pasta de cemento protege el acero de refuerzo de la corrosión, sin embargo, cambios en el pH del concreto pueden darse como producto de fenómenos de difusión al interior de su estructura de sustancias químicas en solución acuosa, siendo entonces la impermeabilidad del concreto un factor trascendente en la estabilidad del acero de refuerzo.

La corrosión del acero de refuerzo, además de la reducción en sus propiedades mecánicas, genera cambios volumétricos en el mismo, que se traducen en tensión internas sobre el concreto, produciendo fisuras y agrietamientos que agudizan la exposición del acero de refuerzo al ataque de agentes químico [11]. El fenómeno de la corrosión del acero embebido en el concreto, se produce cuando este pierde una fina película de óxido que lo pasiva. La rotura de esta película pasivante se da no solamente por la reducción del pH, sino también por la presencia de cloruros en el concreto [12]. Según Moreno (2001), la corrosión del acero de refuerzo constituye el principal factor del deterioro de las estructuras de concreto reforzado, siendo más frecuente en las viviendas. El presente estudio pretende medir el efecto en la resistencia a la tensión del acero como consecuencia de su deterioro por exposición al medio ambiente.

### **3. LA CORROSIÓN DEL ACERO**

Según Mamlouk y Zaniewski [13] la corrosión del acero, genera el deterioro en el mismo; por la reacción electroquímica con el entorno y su producto es el óxido. Es un proceso de óxido-reducción en el que se transfieren electrones de un compuesto a otro, del hierro al oxígeno. Solís, R, Moreno, E y Castro, P, describen la formación de celdas electroquímicas en la superficie del acero durante el proceso de corrosión, como producto de las diferentes concentraciones de iones disueltos [11]. Este proceso de corrosión requiere la conjugación de algunas condiciones fundamentales, sin las cuales no habrá corrosión: 1. El ánodo a corroer (acero), 2. El cátodo para conformar la celda de corrosión (acero), 3. Un conductor (acero) y 4. Un medio electrolítico por el que fluyan los electrones (humedad). El acero solo en su constitución contiene tanto ánodos como cátodos, a la vez que es conductor, mientras la humedad constituye el medio electrolítico [13].

La presencia de algunos contaminantes en el acero y determinadas condiciones ambientales puede acelerar el proceso de corrosión, actuando como catalizadores. Los cloruros provenientes de aguas marinas o de anticongelantes aplicados al concreto y la presencia en el aire de óxidos y azufres coadyuvan en las reacciones de corrosión. Por otro lado, condiciones ambientales húmedas proveen un medio electrolítico que favorece la corrosión.

Según Vera y sus colegas [14], la penetración de cloruros en el concreto constituye una de las causas más comunes de corrosión del acero en ambientes marinos, provocando la falla prematura de la armadura como consecuencia de la corrosión localizada. Estos autores señalan que el cloruro puede alcanzar la estructura de refuerzo por dos vías: 1. Por difusión causada por la diferencia de concentración de agua entre dos puntos del concreto expuesto al agua de mar, ya sea por estar sumergido o en permanente contacto con ella, 2. Por ciclos de humedad y secado del elemento de concreto, donde, una vez el concreto es mojado, actúa el fenómeno de difusión y posteriormente la absorción capilar, tras el secado los cloruros penetrantes, libres de agua, se van concentrando con mayor rapidez.

#### 4. MÉTODO

Para medir el efecto de la corrosión por exposición ambiental sobre la resistencia a la tensión del acero, se han expuesto barras corrugadas de 3/4" de acero de iguales características (tipo de acero, diámetro y longitud), a diferentes tiempos de exposición a la intemperie, (0, 7, 14, 28 y 56 días).

El acero expuesto sin la cobertura que le provee el concreto, debe deteriorarse por la exposición ambiental y como consecuencia sus propiedades mecánicas se alteran, particularmente se revisa la resistencia a la tracción, registrando el valor correspondiente a la carga máxima (Fm). Esta resistencia está definida según la norma NTC-2, como el esfuerzo correspondiente a la mayor carga soportada por el elemento durante el ensayo [15], en este estudio se analiza la carga máxima (Fm). La Figura 1 muestra un esquema de dicha carga según la norma citada.

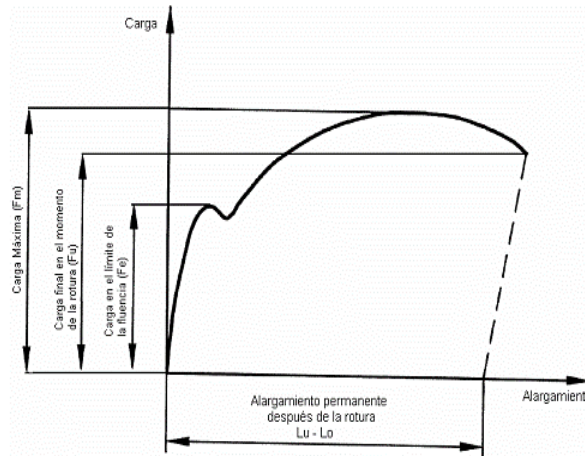


Figura 1. Carga máxima en un elemento de acero ensayado [16]

Las barras de acero fueron sometidas a ensayo de tracción según la norma NTC-2, finalizado su periodo de exposición a la intemperie y los resultados de carga máxima (Fm) se han relacionado en función del tiempo de exposición en días.

#### 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 1 resume los valores de carga máxima en las probetas con diferente periodo de exposición a la intemperie.

Tabla 1. Valores de carga máxima por días de exposición a la intemperie

Días de exposición	Carga máxima (Fm) kN
0	84.94
7	84.5
14	85.5
28	83.84
56	81.91

Los resultados presentan algunas evidencias que apoyan la hipótesis de un deterioro de la resistencia a la tracción en las barras en función de su exposición a la intemperie, cuando menos en el tiempo observado. La Figura 2 muestra comparativamente las magnitudes de carga máxima soportadas por las probetas bajo diferentes periodos de exposición a la intemperie. Se puede deducir una tendencia que indica un decremento en la respuesta a tracción de las barras de acero en función del tiempo de exposición a la intemperie. Si bien a partir de los 14 días de exposición se registra un decremento en la carga máxima soportada, para los periodos de 7 y 14 días se ve un incremento en la misma variable.

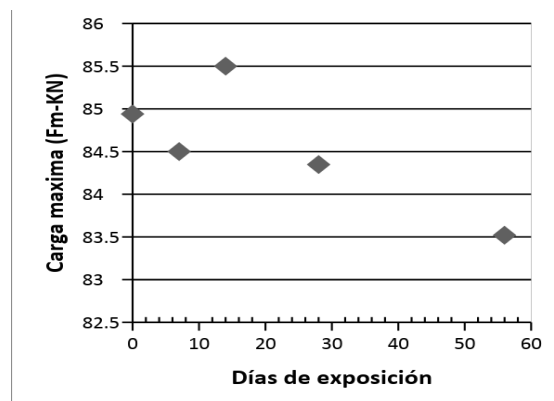


Figura 2. Carga máxima (fm) vs, tiempo de exposición a la intemperie

La norma NTC 2289, indica las características esperables para el acero de refuerzo para el concreto. En esta norma se establece la fluencia mínima en un valor de 420 MPa [17]. Según los valores registrados las probetas cumplen hasta el último día de observación dicho requerimiento. Algunas condiciones pueden explicar los resultados encontrados: 1) El tiempo de exposición a las condiciones de intemperie, puede no ser suficiente para que se presenten alteraciones en las propiedades mecánicas del acero que determinan su comportamiento ante los esfuerzos de tensión de manera más severa; 2) La eventual ausencia de condiciones ambientales y agentes químicos aceleradores del proceso de corrosión en el lugar de exposición, darían cuenta de la necesidad de una mayor exposición en el tiempo para poder observar algún deterioro mayor.

Vera y colegas [18], luego de exponer especímenes de concreto reforzado y monitorear la presencia de precursores de la corrosión, cloruros y carbonatación, y la corrosión del acero en dos ambientes diferentes, señalan que la corrosión del acero depende de las condiciones ambientales y contaminantes propios del lugar de exposición [18]. Este estudio no encontró variaciones en el acero de refuerzo antes de los primeros 200 días de exposición en dos ambientes con condiciones ambientales agresivas, marino e industrial. Si bien las condiciones de recubrimiento bajo concreto del acero de refuerzo en el estudio señalado, difieren de las condiciones del acero en el presente estudio, sin recubrimiento.

La Figura 3, permite ver que el acero en dicho estudio no estuvo totalmente recubierto, condición que emula las condiciones del presente trabajo, y que para efectos de las mediciones realizadas por estos investigadores y sus hallazgos lo podría hacer comparable en algún grado, cuando menos en lo referente a la relación existente entre el deterioro del acero y su relación con el tiempo de exposición. Por otro lado, los ambientes de exposición si difieren notablemente del ambiente del presente trabajo por la ausencia de actividad industrial y condiciones marinas, los cuales son ambientes más ricos en la presencia de cloruros y otros agentes químicos causantes de la corrosión del acero.



**Figura 3.** Probetas expuestas en ambiente industrial [18]

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados, y su confrontación a la luz de las investigaciones consultadas, permiten identificar las siguientes conclusiones:

- La exposición del acero de refuerzo a la intemperie conlleva un deterioro en su respuesta a las fuerzas de tensión, el cual se agudiza en función del tiempo de exposición.
- El acero al oxidarse se debilita, generando disminución en la resistencia mecánica del material, entre mayor sea su oxidación, más se corroe y menor será su resistencia.
- El deterioro del acero a la intemperie es particular en cada caso dependiendo de las características ambientales del lugar de exposición. En el ambiente se configuran varias condiciones que determinan la mayor o menor velocidad de deterioro del acero expuesto a este. En un ambiente con alta humedad, la corrosión es mayor; al igual en ambientes con alta concentración de sales, como las regiones costeras. Sin embargo y debido a que Colombia es un país ubicado en zona tropical, la humedad en el país es bastante elevada y por lo tanto en cualquier parte de su territorio, trayendo como consecuencia para el acero, el oxidarse de forma similar a lo expuesto en éste proyecto.
- Se puede señalar la magnitud de la humedad relativa y la presencia de agentes químicos como cloruros, sulfatos o dióxido de carbón, como elementos que en virtud de su presencia en el ambiente pueden acelerar el proceso de deterioro.
- Es necesario que el acero éste embebido en el concreto para disminuir su corrosión, el concreto debido a su pH básico, protege al acero de la corrosión, repeliendo principalmente a los cloruros y absorbiendo en su estructura gran parte de la humedad ambiental. Por lo cual, y según éste estudio; un máximo 7 días se debe dejar el acero expuesto directamente al ambiente sin ningún tipo de protección.

- Si es necesario dejar el acero expuesto, se recomienda recubrir las barras de acero, hasta colocarse el concreto de recubrimiento; por experiencia laboral de los autores, es una buena práctica recubrir las barras con una mezcla de pasta cemento o cubrirlo con bolsa plásticas para disminuir el efecto de la corrosión; sin embargo, esta práctica protegerá las barras de acero de la corrosión por un periodo máximo de un mes, después de éste tiempo el acero empezará a oxidarse.
- Igualmente se reafirma lo establecido por el reglamento colombiano de la construcción sismo resistente, las barras de acero no se deben colocar con un avanzado grado de oxidación, el cual la norma lo define como una capa de 2 mm de espesor; según éste estudio ese grado de espesor se obtiene a los 10 días, en los cuales se empieza a variar la resistencia. Esto reafirma que las barras de refuerzo de acero máximo se deben dejar 7 días en exposición al ambiente.
- Futuros estudios sobre el tema, pueden incluir además del control de variables ambientales, el registro de otros elementos de caracterización mecánica del acero en el tiempo como: fluencia, esfuerzo, deformación unitaria y variaciones en diámetro de sección.

### **Agradecimientos**

Los autores de este texto agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada, el apoyo de su ejecución bajo el proyecto INV- DIS-2570.

## REFERENCIAS

- [1] Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón reciclado en su aplicación como hormigón armado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [2] Neville, M. (2010). Concrete Technology. London: Pearson.
- [3] Silva, M. et al. (2017). Accelerated action of external sulfate and chloride to study corrosion of tensile steel in reinforced concrete, *Materiales de Construcción* 67(328), e141.
- [4] Sánchez, J. (2017). Determination of the fatigue fracture characteristics of steel MS1700 under corrosion conditions. Sidney: Queensland University of Technology.
- [5] Macormac, R. & Brown, J. (2011). Diseño de concreto reforzado. Alfaomega.
- [6] Nilson, H. (2001). Diseño de estructuras de concreto. New York: McGraw Hill.
- [7] Ospina, M., Rodríguez, K. & Moreno, L. (2017). Análisis técnico-económico del uso del concreto reciclado y el concreto convencional en Colombia. In Serna, M.E. (ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, 2ª ed. (pp. 656-673). Medellín: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- [8] Diego, S. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. Bogotá: Lemoine.
- [9] O'Neill, R. et al. (2008). Guide to durable Concrete ACI 201. Farmington Hills: ACI Committee.
- [10] O'Neill, R. et al. (2001). Guía Para La Durabilidad Del Hormigón. Farmington Hills: ACI Committee.
- [11] Carcaño, S. et al. (2005). Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. *Ingeniería* 9(1), 13-18.
- [12] Posada, B. (2012). La degradación del concreto armado. *Revista Universidad EAFIT* 30(93), 15-23.
- [13] Mamlouk, Z. (2011). Materials for civil and construction engineers. Saddle River: Prentice Hall.
- [14] Vera, R. (2008). Duracon: Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. *Revista de la Construcción* 7(2), 13-23.
- [15] ICONTEC (1995). Ensayo de tracción para materiales. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [16] Invias (2007). Ensayo de tensión de barras y alambres de acero. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- [17] ICONTEC (2007). NTC-2289 - Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación para refuerzo de concreto. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [18] Vera, R. et al. (2009). Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. Parte 2. Resultados de Chile después de 5 años de Exposición. *Revista de la construcción* 8(1), 10-18.
- [19] Correa, E. et al. (2017). Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad. *Ingeniería y Desarrollo* 23, 17-28.
- [20] Invias (2007). Ensayo de tensión de barras y alambres de acero. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- [21] ICONTEC (1995). Ensayo de tracción para materiales metálicos. Método de ensayo a temperatura ambiente. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

# Propuesta de modelamiento numérico de muros delgados de concreto reforzado diseñados para zona de amenaza sísmica alta

Erica L. Arango<sup>1</sup>  
William Valencia M.<sup>2</sup>  
Álvaro Viviescas<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga – Colombia

<sup>2</sup> Universidad del Quindío  
Armenia – Colombia

Actualmente, en respuesta a la alta demanda de vivienda de los países latinoamericanos, se ha incrementado el uso de los sistemas de muros estructurales para edificación en altura; sin embargo, durante los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011), el desempeño sísmico de este sistema no fue el esperado, presentando diferentes manifestaciones de comportamiento frágil, tales como pandeo fuera del plano, aplastamiento de la zona extrema a compresión por ausencia de confinamiento y falta de distribución de la plastificación en altura del muro entre otros. Considerando que los espesores de muros estructurales para el caso de Colombia son usualmente menores a los de Chile y Nueva Zelanda, se especula sobre el desempeño sísmico deficiente que estos puedan tener ante un sismo fuerte. Por lo anterior, se han intensificado los esfuerzos investigativos mediante la modelación numérica y ensayos de laboratorio que permitan determinar el comportamiento de estos muros para cargas sísmicas. El presente trabajo está enfocado en la selección de un modelo no lineal entre los más usados en la literatura científica reciente, su ajuste, validación e implementación para representar numéricamente el comportamiento de muros estructurales característico de la ciudad de Bucaramanga. La pertinencia del modelo se confrontará con modelos de pandeo inelástico fuera del plano obtenidos o validados a partir de campañas experimentales disponibles en la literatura científica y se identificarán parámetros relevantes en la respuesta estructural de esta tipología de muros.

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de edificaciones de muros estructurales se ha extendido masivamente en varios países, gracias a su capacidad para resistir cargas laterales por acciones sísmicas, reducción de materiales, tiempo y por ende costos del proceso constructivo [1]. Sin embargo, durante los sismos recientes como el de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) se ha evidenciado vulnerabilidad del sistema estructural en desempeño sísmico. Jünemann et al. [2] resaltan los bajos espesores de los muros como uno de los principales factores de vulnerabilidad en los edificios que sufrieron daño. El espesor de los muros dañados varía de 15 a 28 cm, valores pequeños comparados con los de los edificios de Viña del mar durante el sismo de 1985, que oscilaban entre 30 y 50 cm, cuyo comportamiento no reflejó las mismas tipologías de falla. En el caso de Nueva Zelanda se presentan espesores entre 20 y 40 cm [3], en edificios que presentaron daño frente al sismo de Christchurch (2011); Esto es relevante, dado que la ductilidad de los muros es controlada por la sección de concreto confinado (elementos de borde) y, por tanto, los muros de menor espesor, donde no se da una zona de confinamiento, son más susceptibles a presentar fallas. En Colombia los espesores de muros en concreto reforzado son típicamente menores que los usados en Chile y Nueva Zelanda, con una tendencia a los 15 cm, consecuencia de la falencia de criterios restrictivos de espesores para muros en concreto reforzado en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR 2010), adaptada del reglamento para concreto estructural establecido por el Instituto Americano del Concreto (ACI 318-14). En la ciudad de Bucaramanga, donde existe escasez de terreno, se ha adoptado masivamente la construcción en altura con el sistema industrializado de muros delgados, aumentando el riesgo frente a un sismo dado que la ciudad se encuentra ubicada en una zona de amenaza sísmica alta y hasta el momento no se registra ningún tipo de estudio sobre este sistema estructural.

Los avances realizados en la literatura científica establecen que el éxito para simular el comportamiento de muros depende de representar satisfactoriamente la interacción entre las respuestas de flexión, cortante y carga axial además de la complejidad generada al incluir el efecto de los elementos de borde en el comportamiento del muro [4] y la disminución de la resistencia del concreto después de sufrir agrietamiento [5], entre otros. Esto ha sido ampliamente estudiado para desarrollar un modelo analítico que permita articular dichas condiciones, pero hasta el momento no se evidencia en la bibliografía científica un modelo fiable capaz de incorporar todas estas variables [6]. A esto se suma que uno de los daños recurrentes observados en los sismos de Chile y New Zelanda corresponden pandeo inelástico fuera del plano [7]. Este último tipo de falla no ha sido tenido en cuenta para la formulación de los modelos utilizados hasta el momento. El presente trabajo está enfocado en la selección de un modelo con la mejor representación de las características del sistema de muros estructurales en la ciudad de Bucaramanga, a partir de los modelos no lineales utilizados actualmente en la literatura científica, además de la revisión de los modelos de pandeo fuera del plano con el objetivo de plantear una alternativa para su incorporación y uso a partir del modelo.

---

<sup>1</sup> erica2178166@correo.uis.edu.co

<sup>2</sup> wvalencia@uniquindio.edu.co

<sup>3</sup> alviviya@uis.edu.co

## 2. MÉTODO

El proceso de selección del modelo se apoya en una consulta bibliográfica y su categorización. A continuación, se mencionan los modelos evaluados:

### 2.1 Analogía de columna ancha

Este modelo inicialmente desarrollado por Clough et al. [8] y Bertero et al. [9], idealiza el muro de concreto reforzado como una columna ancha estándar, asignándole las propiedades del muro, usa elementos tipo viga como un enlace rígido y concentra la masa de cada piso en el nivel correspondiente para simular el efecto de inercia horizontal [10]. Según Galal y El-Sokkary [11] este modelo permite determinar la capacidad en términos de rotación o desplazamiento entre pisos, además Carrillo y Alcocer [12] mencionan que es sencillo de aplicar y tiene un bajo costo computacional, aun cuando se trata de un análisis no lineal de grandes edificios. Sin embargo, este modelo no puede captar el comportamiento cíclico de elementos de borde, especialmente bajo la acción de una carga axial elevada o demandas cíclicas horizontales [13] y Sedgh et al. [14] establecen que, dado que no tiene en cuenta la interacción cortante-flexión, la resistencia al corte y la rigidez no se degradan, aumentando así las demandas de flexibilidad de rotación.

### 2.2 Modelo sección de fibra

La idea del modelo fue introducida por Park et al. [15]. El modelo puede representar el comportamiento inelástico en elementos de concreto reforzado, basándose en una geometría lineal y distribución de fuerza axial en la longitud del elemento, el cual, es fraccionado en capas de fibra transversales y paralelas, con características geométricas locales. Taucer y Spacone [16] explican que la respuesta global del elemento es definida por integración numérica desde la respuesta de las fibras. Pese a que logra capturar adecuadamente la respuesta a flexión y otorga información razonable para deformaciones cortantes [17], las hipótesis del modelo solo son aceptables para pequeñas deformaciones y desplazamientos, cuando el material sea homogéneo. Por otro lado, Filippou y Taucer [18] exponen que el modelo puede integrar el efecto de agrietamiento y endurecimiento por deformación, a partir de conceptos de elementos finitos; por otro lado, Monti y Spacone [19] mencionan el problema del modelo para adecuar el refuerzo y la importancia de un amplio conocimiento de las propiedades de los materiales (concreto, acero). Posteriormente, Kotronis et al. [20] explican la complejidad al simular los elementos de borde.

### 2.3 Modelo puntal - tensor

Este modelo asume el muro como una armadura estáticamente determinada, discretizado en paneles rectangulares. Galal y El-Sokkary [11] describen la utilización de varios elementos tipo viga: dos verticales, que representan los elementos de borde; uno diagonal, que representa la compresión, cuya resistencia se degrada gracias a las deformaciones biaxiales que hacen las veces de puntales o tensores y dos horizontales que representan el refuerzo a cortante. A cada uno de estos elementos se asignan propiedades del concreto y acero por medio de regiones de aferencia, evitando superposición entre elementos [14]. Una de las limitaciones de este enfoque es la asignación de propiedades a los elementos tipo cercha bajo carga cíclica [21]. Además, la discretización de elementos resulta ser proceso complejo y es difícil acoplar los tipos de falla producidos por carga lateral [22].

### 2.4 Modelo de múltiples resortes.

El modelo inicial de múltiples resortes, propuesto por Takayanagi y Schnobrich [23], consistía en un número de resortes conectados en serie a elementos rígidos, cada resorte con propiedades inelásticas de acuerdo con la longitud del elemento y el nivel de carga axial. Después la idea se adapta para múltiples resortes de forma axial, como una herramienta confiable para predecir la respuesta de muros de cortante por Kabeyasawa et al. [24]. Este planteamiento estaba limitado en términos de la inclusión de las respuestas de flexión y cortante, por lo que Orakcal et al. [25] desarrollan un tipo modelo bidimensional de un elemento único con seis grados de libertad globales MVLEM, que describe la respuesta a cortante tanto a nivel global como local, incorporando la respuesta a flexión (desacoplada) a través del cálculo de rotaciones y desplazamientos transversales. A partir de estos principios, se desarrolla el modelo SFI\_MVLEM, que busca el acoplamiento de las respuestas de cortante y flexión. Kolozvari et al. [26] incorporan un elemento tipo panel de concreto reforzado para reemplazar los elementos del MVLEM; además, incorpora condiciones de carga cíclica y el modelo desarrollado por Ulugtekin [27] para integrar los efectos de cortante. Entre las ventajas de este modelo está la consideración de diferentes modelos constitutivos para representar de manera más realista los mecanismos de falla; está incorporado en OpenSees, y es aplicable a muros con esbeltez entre moderada y alta [28]. No obstante, el modelo es incapaz de captar la degradación de la resistencia asociada a modos de falla como pandeo del acero de refuerzo, falla deslizante a lo largo de las grietas, o inestabilidad lateral del límite de compresión [29]; asimismo, requiere de una gran cantidad de parámetros empíricos para su calibración.

### 2.5 Micromodelos

El método surge por la necesidad representar el comportamiento a flexión biaxial. Este tipo de modelos discretiza el elemento de concreto reforzado en un número finito de pequeños elementos, interconectados en un número finito de puntos nodales [30] Orakcal et al. (2004) explican que con los micromodelos se obtiene una respuesta eficiente de las fallas locales a flexión biaxial y hay amplias posibilidades de modelación para los fenómenos relacionados con el



comportamiento del concreto bajo acciones dinámicas; pero su fiabilidad es cuestionable debido a la complejidad de la interpretación de resultados, baja eficiencia para simular directamente el cortante y la fluencia del enlace acero-concreto [29], por lo cual, Folié y Petronijević [30] no recomiendan su implementación para muros estructurales, y tampoco se encuentra un amplio uso de estos modelos en el análisis dinámico no lineal, debido a lo complejo de su formulación, los grandes requerimientos computacionales [29] y que no es recomendable para modelaciones de edificios completos [31].

### 3. RESULTADOS

Los modelos son clasificados usando diferentes criterios, los cuales se establecen en forma matricial para la selección y comparación entre los mismos. Es una matriz de carácter cuantitativo y cualitativo que se construye a partir las siguientes metodologías: Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), una herramienta que orienta la toma de decisiones con múltiples atributos, a través de la descomposición del objeto de estudio en una jerarquía de criterios involucrados y su respectiva evaluación sistemática por medio de comparaciones entre ellos [32]. A cada uno de los criterios se les asigna un valor de la importancia que tiene frente a cada uno de los demás según lo sugerido por Saaty [33] en un rango de 1 a 9. El otro criterio es el modelo de puntuación (MP), el cual establece la solución a un problema determinado mediante la evaluación de diferentes aspectos [34]. El método consiste en asignar un peso entre 0 y 1 a cada criterio según el grado de importancia. Ambos modelos son implementados de manera conjunta, el PAJ valida los valores porcentuales asignados previamente con MP. Una vez definidos los pesos se asigna una calificación de 0 a 5 a los modelos y se opera con los ponderados. Para la aplicación de la técnica se definen las siguientes categorías:

- **Complejidad:** Considera el grado de dificultad para la aplicación del modelo, relacionado con las características de representación, recursos, formulación y tiempo de calibración.
- **Aplicabilidad:** En consideración de las necesidades de la investigación, tiene en cuenta las posibilidades de aplicación del modelo, responde las preguntas ¿Cuántas veces se ha usado? ¿En qué condiciones ha sido implementado?
- **Accesibilidad:** Categoría evaluada para requerimientos de software, discrimina el tipo de licencia y evalúa la facilidad de comunicación con sus autores y usuarios, a través de diversos mecanismos: correo electrónico; foros; blogs; recetarios; manuales; artículos y atención al cliente.
- **Requerimientos:** Orientada con respecto a los requerimientos computacionales que exige el modelo para su implementación y aplicación.
- **Funcionalidad:** Se relaciona con la usabilidad del modelo. Evalúa el desempeño del modelo en la etapa de calibración y validación, según lo reportado en la literatura consultada. Los modelos son evaluados según el error que presenta en la estimación de una variable.
- **Características:** involucra los supuestos principales que fueron empleadas para el desarrollo del modelo, toma en cuenta la valoración de aspectos como el tipo de análisis en el que se puede usar; la compatibilidad de datos y el método de solución.

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las ponderaciones de cada categoría que se muestran en la Tabla 1 hay una tendencia alrededor de dos valores en el grupo de categorías. El primero de ellos, un promedio de 0.24, que reúne las categorías Complejidad, Aplicabilidad y funcionalidad, enfocadas principalmente a la posibilidad real de implementar el modelo para cumplir con los propósitos del presente trabajo. El segundo un valor promedio de 0.09, contiene las categorías de Accesibilidad, Requerimientos, y Características, aspectos que son importantes pero que no impiden el proceso de modelación.

Cada uno de los modelos mencionados en la sección anterior han sido evaluados según el procedimiento descrito y bajo los pesos ponderados mostrados en la Tabla 1. A continuación, en la Tabla 2 se muestra el resultado acumulado para cada modelo.

- **Columna amplia:** Un modelo sencillo de aplicar y de baja complejidad, con un puntaje acumulado de 3,11. No apto para implementarse, debido a la poca información disponible y elevado error de estimación en el tipo de fallas, lo cual, concuerda con los bajos valores acumulados en la categoría de accesibilidad (0,2), requerimientos (0,36) y características del modelo (0,33).
- **Fibras:** Pese a contar con un nivel bajo de complejidad y ser altamente funcional para los propósitos de la investigación, es un modelo que no cuenta con disponibilidad de software ni código fuente, haciéndolo poco accesible (0,16) e incumpliendo con los requerimientos necesarios (0,26).
- **Puntal-tensor (2,97):** La disponibilidad de información sobre el modelo no es suficiente para ser implementado, principalmente, por la falta de código fuente y deficiencias para su desempeño en el proceso de calibración, lo cual, lo convierte en un modelo poco accesible (0,19), no cumple satisfactoriamente con los requerimientos de modelación (0,30) y es poco funcional. Sin embargo, hay que resaltar que es uno de los modelos más completos a la hora se representación de mecanismos de falla y su formulación es simple.

- *MVLEM* (3,43): La complejidad del modelo radica en la consideración de los tipos de falla principales (flexión y cortante) desacopladas y la elevada cantidad de parámetros necesarios para calibrar el modelo (complejidad 0,69), pero es un modelo bien documentado y eso lo hace aplicable (0,85) y funcional (0,83) para los propósitos del trabajo.
- *SFI-MVLEM* (3,92): Dentro del grupo de modelos estudiados, es el más completo en términos del comportamiento y tipos de falla para los muros estructurales, pese a su compleja formulación y gran cantidad de parámetros en el proceso de calibración, es un modelo altamente funcional (1,03), aplicable (0,94) y con un nivel de complejidad razonable (0,79)
- *Micromodelos* (2,52): Son modelos de gran complejidad (0,37), de los cuales no hay suficiente información disponible y que para los fines del trabajo no son propicios, dada la alta demanda computacional que estos implican.

**Tabla 3.** Categorías y criterios de selección

No.	Categorías	Ponderado	Criterio	Ponderado
1	Complejidad	0,25	Nivel de formación usuario	0,13
			Tipos de falla modelados ¿están acoplados?	0,27
			Número de parámetros	0,18
			Facilidad de calibración	0,17
			Modelos constitutivos	0,12
			Tiempo de calibración	0,13
2	Aplicabilidad	0,23	Disponibilidad de software	0,25
			Facilidad de implementación	0,37
			Representación campaña experimental	0,38
3	Accesibilidad	0,08	Tipo de licencia del modelo	0,23
			Sistema operativo	0,17
			Disponibilidad código fuente	0,32
			Cobertura del soporte técnico	0,28
4	Requerimientos	0,10	Datos requeridos	0,38
			Acceso a internet	0,10
			Interfaz y compatibilidad	0,27
			Capacidad de computo	0,25
5	Funcionalidad	0,23	Disponibilidad de información	0,23
			Desempeño en la calibración	0,15
			Desempeño en la validación	0,15
			Error en la estimación de fallas	0,30
			Tipos de muros modelados	0,17
6	Características	0,10	Elástico lineal o Elástico no lineal	0,12
			Inelástico (no lineal)	0,37
			Modelación micro y/o macro	0,25
			Compatibilidad de datos	0,15
			Método de solución del modelo	0,12

**Tabla 4.** Ponderado por categorías

No.	Categorías	Colum-ancha	Fiber	Truss	MVLEM	SFI-MVLEM	Micro
1	Complejidad	0,75	0,70	0,77	0,69	0,79	0,37
2	Aplicabilidad	0,99	0,41	0,64	0,85	0,94	0,44
3	Accesibilidad	0,20	0,16	0,19	0,35	0,42	0,21
4	Requerimientos	0,36	0,26	0,30	0,30	0,31	0,24
5	Funcionalidad	0,49	0,68	0,65	0,83	1,03	0,79
6	Características	0,33	0,42	0,41	0,41	0,44	0,49
	$\Sigma$	3,11	2,64	2,97	3,43	3,92	2,52

Nota: Contiene el acumulado de cada modelo por categoría y la valoración total, que permite seleccionar el modelo

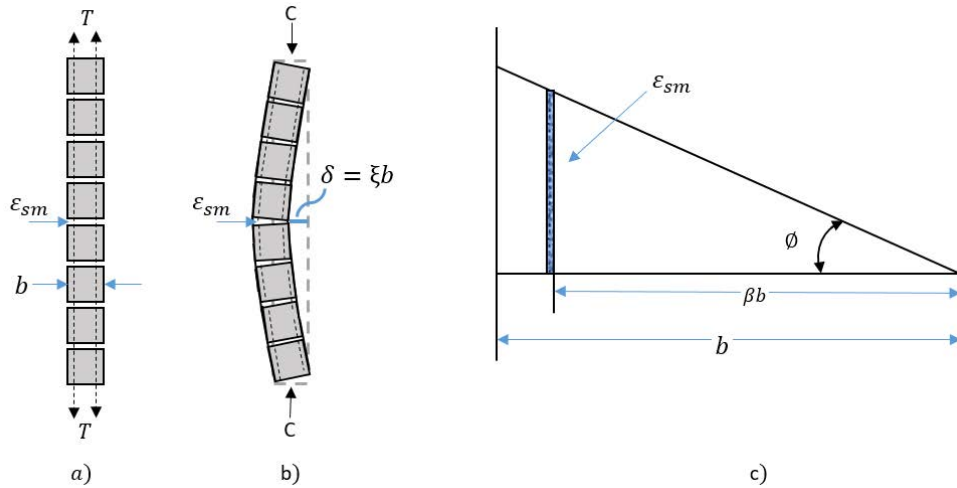
El modelo seleccionado según el procedimiento es SFI-MVLEM, descrito brevemente antes basado en MVLEM, incluye paneles de concreto reforzado que trabajan con un modelo de fibras macroscópico para acoplar la respuesta de flexo-compresión y cortante. Como se mencionó anteriormente, una deficiencia relevante del modelo es la incapacidad de capturar modos de falla fuera del plano asociados a grandes deformaciones de las barras de refuerzo bajo carga a compresión posterior a la tracción, lo cual no fue tenido en cuenta para su formulación.

#### 4.1 Modelos fallas fuera del plano

Los primeros avances realizados sobre el pandeo inelástico de muros de concreto reforzado fueron dirigidos por Paulay y Goodsir [35], quienes describen los detalles del mecanismo de falla fuera del plano para estos elementos a partir de la observación de varias campañas experimentales, especificando que el pandeo se basa en demandas plásticas de los extremos de los muros [36]. Ante la acción de cargas elevadas las barras de refuerzo experimentan deformaciones plásticas por tracción y el extremo confinado empieza a agrietarse; en la descarga ya hay una deformación plástica acumulada en las barras y las grietas permanecen abiertas [37]. Dependiendo del detalle de refuerzo se puede presentar dos escenarios: si el caso es de un muro con doble capa de refuerzo, en el momento del

nuevo ciclo de tracción, la segunda capa de refuerzo longitudinal (que aún no ha cedido en compresión) es la principal fuente de rigidez fuera del plano; pero para muros con una sola capa de refuerzo, tal restricción no existe, lo que lleva a una rigidez fuera del plano mucho más baja y desplazamientos más grandes [38].

La ocurrencia de cualquiera de estos dos escenarios depende principalmente de la deformación inelástica máxima a tracción en los extremos del muro, que fue adoptada por Paulay y Priestley [39] como parámetro de la probabilidad de ocurrencia de pandeo, sobre el mecanismo base de Goodsir, el nuevo modelo fenomenológico se basa en dos componentes fundamentales: primero, un criterio de estabilidad asumiendo una zona de compresión bidireccional; y segundo, un modelo de excentricidad de deformación que relaciona la deformación residual del acero longitudinal, con una relación de excentricidad, calculada como desplazamiento fuera del plano dividido por el espesor del muro [40] como se muestra en la Figura 1. Luego de resolver el equilibrio bidireccional, asumiendo un bloque de esfuerzos rectangular equivalente, se satisfacen la desigualdad de la ecuación (1) para permanecer estable y también se calcula un radio de curvatura constante fuera del plano, de la forma en ecuación (2).



**Figura 4.** Inestabilidad lateral del muro previo a la fluencia. Adaptado de [38, 40]

Chai y Elayer [41] ajustaron el modelo Paulay y Priestley [39] para calcular relaciones máximas de excentricidad, incluyendo nuevos datos experimentales como comportamiento histerético del acero de refuerzo, con una distribución de curvatura sinusoidal en toda la región de rotula plástica (más realista y menos conservadora), un factor para considerar la deformación de acero recuperada elásticamente y la deformación requerida para inducir la fluencia del acero a compresión, resumida en la ecuación (3) [40]. Esta permite calcular valores más grandes de  $\epsilon_{sm}$  que los de la ecuación (2).

$$\xi_{cr} = 0,5 \left( 1 + 2,35 m - \sqrt{5,53 m^2 + 4,70m} \right) \leq 0,5 \quad (1)$$

$$\epsilon_{sm} = 8\beta(b/l_0)^2 \xi \quad (2)$$

$$\epsilon_{sm} = \pi^2 \beta (b/l_0)^2 \xi + 3\epsilon_y \quad (3)$$

Donde:

$\xi_{cr}$  = Relación de excentricidad máxima.

$\epsilon_{sm}$  = Deformación residual del acero longitudinal.

$\xi$  = Relación de excentricidad.

$m$  = Relación de refuerzo mecánico, calculada como  $(\rho_l f_y) / f'_c$

$\rho_l$  = Relación de acero longitudinal.

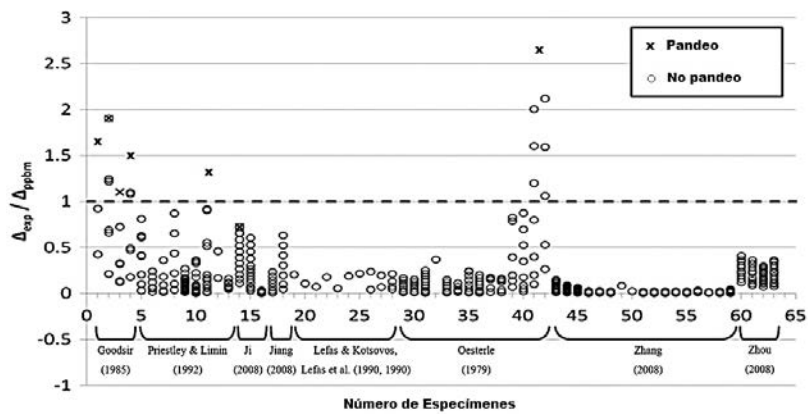
$f_y$  = Resistencia a la fluencia del acero.

$f'_c$  = Resistencia a la compresión del concreto.

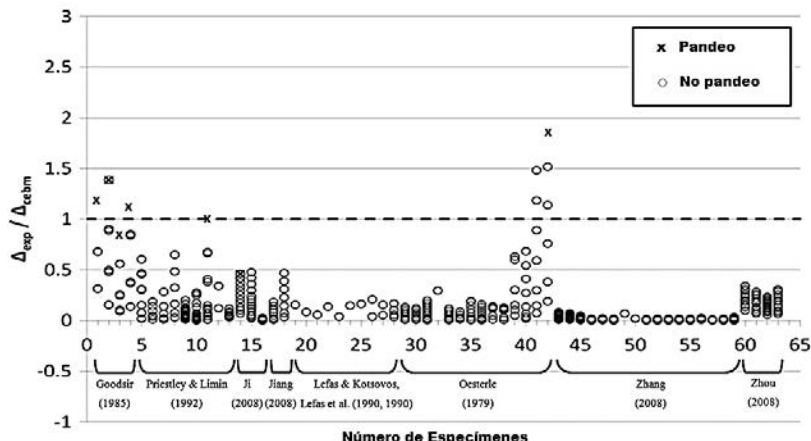
$\beta b$  = Distancia desde el lado interior del muro hasta el refuerzo longitudinal extremo.

$l_0$  = Altura de la región pandeada.

Estos modelos otorgan resultados aceptables y aplicables para la estimación del fenómeno de pandeo en muros estructurales; dado que el modelo de Paulay y Priestley subestima resistencia de la sección al pandeo (es más conservador) podría implementarse para diseño, mientras que el modelo de Chai y Elayer, el cual predice con mayor exactitud dicha capacidad, es más adecuado para evaluación. Los resultados obtenidos con estos modelos fueron verificados por Herrick y Kowalsky [40] mediante su confrontación con 63 especímenes de muros de concreto reforzado ensayados en laboratorios. En la Figura 2 se muestran los especímenes agrupados por autor y se les asignan etiquetas numéricas individuales, que se muestran a lo largo del eje horizontal. Cada punto de datos representa la demanda de esfuerzo aplicado antes de que ocurra una inversión de carga. Una X indica que se observó pandeo en la siguiente inversión de carga, mientras que un círculo abierto indica que no se observó pandeo.



(a)



(b)

**Figura 5.** Desplazamientos experimentales de muros normalizados por pandeo: a) Paulay y Priestley y b) Chai y Elayer. Adaptado de Herrick y Kowalsky [40]

Además, los avances investigativos han permitido establecer los parámetros que afectan en mayor medida la ocurrencia de falla fuera el plano, determinadas principalmente por las propiedades geométricas del muro como altura, longitud y espesor; también, se ha identificado una influencia significativa en la deformación axial, ancho de la grieta y excentricidad del refuerzo longitudinal. Sin embargo, esto no ha sido suficiente para estimar adecuadamente del pandeo inelástico fuera del plano, Beyer y Rosso [41] señalan que hay falencias y falta de estudio sobre la longitud de ocurrencia del pandeo y el comportamiento de elementos de borde. Por otra parte, es importante resaltar que estos modelos fueron formulados para muros en condiciones diferentes a algunos comúnmente usados en Colombia que se caracterizan por tener espesores menores (y por lo tanto sin elementos de borde efectivos) y una sola malla electrosoldada central como refuerzo.

Como consecuencia de las limitaciones mencionadas anteriormente y teniendo en cuenta que en la bibliografía actual no se evidencia un modelo fiable capaz de capturar los modos de falla más relevantes en edificios de muros cortantes [42], como se puede verificar con la formulación del modelo seleccionado, se propone incorporar el modelo de pandeo sugerido por Paulay y Priestley, para complementar las respuestas de modelo SFI-MVLEM, a través de la inclusión de las ecuaciones (1) y (2) en el código del SFI-MVLEM se calcula una deformación unitaria crítica a tracción; una vez el muro alcance esta deformación, en el ciclo posterior ocurre el fenómeno de pandeo. Cabe mencionar que éste es aplicable para muros con espesores mayores a los encontrados típicamente en Colombia y se decide aplicar el modelo de Paulay y Priestley porque su formulación se puede extender a muros con una sola capa de refuerzo longitudinal, mientras que el modelo de Chai y Elayer se basa en muros con doble capa de refuerzo [43].

Por otra parte, entre los aspectos más relevantes para la ocurrencia del pandeo inelástico fuera del plano está el máximo esfuerzo a tracción que sufre el acero longitudinal [44] antes de fluir por compresión, por lo cual se ha asociado al estudio de inestabilidad de muros en concreto reforzado. A partir de esto se propone calcular un factor de reducción de resistencia debida al efecto del pandeo inelástico; desde la fórmula general de carga crítica de Euler, típicamente usado en columnas como una relación directamente proporcional al módulo de rigidez a la flexión ( $EI$ ) e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud efectiva del elemento ( $kL$ ) [45]. Se pretende utilizar una versión modificada de esta ecuación, para simular los extremos del muro sometidos a carga axial de compresión posterior a la respuesta en tracción significativa, momento en el cual las propiedades mecánicas de los materiales se han degradado. Para esto, se requiere modificar la rigidez a flexión ( $EI$ ) del elemento por una rigidez a flexión equivalente y la longitud efectiva por una longitud equivalente de pandeo. El cálculo de este factor permitirá establecer qué

porcentaje de capacidad a flexión pierde el elemento por carga a compresión, para afectar los resultados obtenidos con el modelo SFI.MVLEM del comportamiento en el plano. Es importante resaltar que este planteamiento no pretende ser un modelo para representar de manera detallada el fenómeno de pandeo inelástico fuera del plano, sino otorgar un estimativo del orden de capacidad de flexo-compresión que pierde el muro por este concepto y sea útil para efectos prácticos de diseño.

## 5. CONCLUSIONES

Es importante generar un modelo simple que sea capaz de incorporar el efecto de pandeo inelástico fuera del plano en muros delgados de concreto reforzado para propósitos de diseño, dado el comportamiento deficiente de algunos muros durante los sismos de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011); adicionalmente, los resultados obtenidos en diferentes ensayos de laboratorio permiten intuir que los muros delgados de concreto reforzado (como los usados en Colombia) presentarán modos de falla similares ante un sismo fuerte, con el agravante de su mayor susceptibilidad al pandeo inelástico por sus características geométricas, propiedades mecánicas y disposición del refuerzo utilizado .

Se realizó un análisis de eficiencia entre los modelos usados en la bibliografía científica con el fin de determinar el que mejor se adapta para representar el comportamiento de muros delgados de concreto reforzado de acuerdo a las necesidades particulares de este proyecto. Para este análisis, se utilizó una metodología de selección multi-criterio en la cual se tomaron en cuenta factores como la complejidad en la implementación y comprensión del modelo, sus requerimientos computacionales, la robustez en cuanto a representación del fenómeno a modelar y la accesibilidad a la información, entre otros. Este análisis se llevó a cabo para estimar la conveniencia del modelo en términos "costo-beneficio", y como resultado de éste se seleccionó el macromodelo SFI-MVLEM.

Para complementar la limitación principal del SFI-MVLEM en cuanto a la representación del pandeo inelástico, se plantean dos alternativas; la primera, incorporar el modelo fenomenológico de Paulay y Priestley al modelo existente para, además de representar la interacción flexión-cortante, incluir el efecto del pandeo inelástico fuera del plano y la segunda alternativa, consiste en estimar de manera simplificada el porcentaje de capacidad a flexo-compresión en el plano que pierde un muro delgado de concreto reforzado debido al pandeo inelástico fuera del plano por comportamiento cíclico basado en la ecuación de carga axial crítica de Euler para una franja equivalente del muro, con propiedades mecánicas y geométricas modificadas (rigidez a flexión degradada y longitud efectiva equivalente). En este momento se está desarrollando la investigación para determinar, entre otras variables, la longitud paralela a  $L_w$  de la sección transversal de esta franja localizada en el extremo del muro para simular sección transversal efectiva que permita la aplicación de la metodología propuesta. Además, se deben determinar las propiedades mecánicas y geométricas equivalentes (rigidez a flexión y longitud efectiva entre otras).

Aunque existen modelos (como el de Paulay y Priestley y el de Chai y Elayer) que estiman de manera aceptable la susceptibilidad al pandeo inelástico de muros de concreto reforzado, los mismos están basados en modelos fenomenológicos más complejos de los que se quiere incorporar para efectos prácticos de diseño, y aplican para muros con características (especialmente espesores y configuración de refuerzo), que no se adaptan a la tipología común en Bucaramanga.

## REFERENCIAS

- [1] Pérez, C. (2010). Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en ingeniería, Universidad de Cataluña.
- [2] Jünemann, R. et al. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures* 82, 168-185.
- [3] Kam, W., Pampanin, S. & Elwood, K. (2011). Seismic performance of reinforced concrete buildings in Christchurch (lyttelton) earthquake. *Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering* 44, 239-278.
- [4] Su, R. & Wong, S. (2007). Seismic behaviour of slender reinforced concrete shear walls under high axial load ratio. *Engineering Structures* 29(8), 1957-1965.
- [5] Belarbi, A. & Hsu, T. (1995). Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension - compression. *ACI Structural Journal* 92(5), 562-573.
- [6] Kolozvari, K. & Wallace, J. (2016). Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls. *American Society of Civil Engineers* 12, 142-157.
- [7] Dashti, F., Dhakal, R. & Pampanin, S. (2017). An experimental study on out-of-plane deformations of rectangular structural walls rectangular structural walls subject to in-plane. In 16th World Conference on Earthquake. Santiago de Chile.
- [8] Clough, R., King, I. & Wilson, E. (1964). Structural analysis of multistory buildings. *Journal of the Structural Div.* 90, 19-34.
- [9] Bertero, V. et al. (1984), Earthquake Simulator Tests and Associated Experimental, Analytical and Correctional Studies of One-Fifth Scale Modeling, Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures. *American Concrete Inst.* 84(13), 375-424.
- [10] Smith, B. & Girgis, A. (1984). Simple analogous frames for shear wall analysis. *Journal of Structural Engineering* 110(11), 2655-2666.
- [11] Galal, K. & El-Sokkary, H. (2008). Advancement in Modeling of RC Shear Walls. In 14 The World Conference on Earthquake Engineering.
- [12] Carrillo, J. & Alcocer, S. (2012). Backbone Model for Performance-Based Seismic Design of RC Walls for Low-Rise Housing. *Earthquake Spectra* 28, 943-96.
- [13] Matsagar, V. (2014). Advances in structural engineering. Dynamics. Volume two. India: Springer.
- [14] Sedgh, R., Dhakal, R. & Carr, A. (2015). State of the Art: Challenges in analytical modelling of multi-story shear wall buildings. *New Zealand Society for Earthquake Engineering Inc.*
- [15] Park, R. & Paulay, T. (1972). *Reinforced Concrete Structures*. New York: Wiley.
- [16] Taucer, F. & Spacone, E. (1991). A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures. *Universidad de California*.
- [17] Diotallevi, P., Landi, L. & Cardinetti, F. (2008). A fibre beam-column element for modelling the flexure-shear interaction in the non-linear analysis of RC structures. In 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- [18] Filippou, F. & Taucer, F. (1996). Fiber beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: part I formulation. *Earthquake engineering and structural dynamics* 25, 711-725.
- [19] Monti, G., Filippou, F. & Spacone, E. (1997a). Reinforced concrete fiber beam element with bond-slip. *Journal of structural engineering* 126(6), 654-661.
- [20] Kotronis, P., Ragueneau, F. & Mazars, J. (2005). A simplified modeling strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8 design. *Ingeniería estructural* 27(8), 1197-1208.
- [21] Papadopoulos, P. et al. (2012). Achievements of Truss Models for Reinforced Concrete Structures. *Open Journal of Civil Engineering* 2, 125-131.
- [22] Martínez, A. & Daza, R. (2017). Modeling of thin reinforced concrete walls. In VIII Congreso Nacional de ingeniería sísmica. Barranquilla, Colombia.
- [23] Takayanagi, T. & Schnobrich, W. (1976). Computed behavior of reinforced concrete coupled shear walls. Reporte No. SRS 434. *Universidad de Illinois*.
- [24] Kabeyasawa T. et al. (1983). Analysis of the Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Test Structure. In Second US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures. Sapporo, Hokkaido.
- [25] Orakcal, K. et al. (2004). Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls - Model Attributes. *ACI Structural Journal* 101(5), 3-18.
- [26] Kolozvari, K., Orakcal, K. & Wallace, J. (2015). Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. I: Theory. *Journal of Structural Engineering* 141(5), 401-413.
- [27] Ulugtekin, D. (2010). Analytical modeling of reinforced concrete panel elements under reversed cyclic loadings. M.S. tesis, *Universidad de Bogazici*. Turquía.
- [28] Kolozvari, K. et al. (2015). Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. II: Experimental Validation. *Journal of Structural Engineering* 141(5), 401-413.
- [29] Kolozvari, K., Orakcal, K. & Wallace, J. W. (2018). New OpenSees models for simulating nonlinear flexural y coupled shear-flexural behavior of RC walls and columns. *Computers and Structures* 196, 246-262.
- [30] Folié, R. & Petronijević, P. (2014). Modelling of RC walls under seismic actions. In Conferencia internacional de logro moderno en ingeniería civil.
- [31] Dashti, F., Jalali, A. & Malekpoor, S. (2011). Parametric investigations on an RC wall macro model. *Procedia Engineering* 14, 329-335.
- [32] Medina, F. et al. (2010). Aplicación de técnicas de toma de decisión multi-criterio discretas al proceso de selección de proveedores sanitarios. In XIV International congress on project engineering.
- [33] Saaty T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill.
- [34] Roche, H. & Viejo, C. (2005). Métodos Cuantitativos Aplicados a la Administración: Análisis Multi-criterio en la Toma de Decisiones. *Facultad de Ciencias Económicas y de Administración de Montevideo*.
- [35] Paulay, T. & Goudsir, W. (1985). The ductility of structural walls. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* 18, 250-269.

- [36] Haro, A. (2017). Assessment of the out-of-plane buckling instability of ductile reinforced concrete structural walls. Tesis doctoral, Universidad Carolina del Norte.
- [37] Dashti, F. & Pampanin, S. (2014). Simulation of out-of-plane instability in rectangular rc structural walls. In II European conference on Earthquake Engineering and seismology.
- [38] Parra, P. & Moehle, J. (2014). Lateral Buckling in Reinforced Concrete Walls. In Tenth National Conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska.
- [39] Paulay, T. & Priestley, M. (1993). Stability of ductile structural walls. *ACI Structural Journal* 90, 385–392.
- [40] Herrick, C. & Kowalsky, M. (2017). Out-of-Plane Buckling of Ductile Reinforced Structural Walls due to In-Plane Loads. *Journal of Structural Engineering* 143 (3), 35-48.
- [41] Beyer, K. & Rosso, A. (2015). State-of-the-art and new experimental findings. In *Bull Earthquake Eng., Springer Science Business Media Dordrecht*.
- [42] Kolozvari, K. & Wallace, J. (2016). Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls. *American Society of Civil Engineers* 12, 142-167.
- [43] Chai, Y. & Elayer, D. (1999). Lateral stability of reinforced concrete columns under axial reversed cyclic tension and compression. *ACI Structural Journal* 96, 1–10.
- [44] Rosso, A., Almeida, J. & Beyer, K. (2015). Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: state-of-the-art and new experimental finding. *Bulletin of Earthquake Engineering* 14 (2), 455–484.
- [45] Fernando, J. et al. (2014). Análisis no lineal del pandeo de columnas esbeltas para cargas estáticas. In *MASKANA, I+D+ingeniería*.
- [46] Almeida, J. et al. (2014). New experimental findings on the stability of thin reinforced concrete walls. In *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Liboa*.

# Los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial: Una revisión actual

\*\*\*\*\*

Jherson J. Bohórquez<sup>1</sup>

Nel S. Oviedo<sup>2</sup>

Guillermo Mejía<sup>3</sup>

Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga – Colombia

Es evidente que el fenómeno de los sobrecostos está presente en los proyectos de construcción de infraestructura vial, caracterizándose por su variabilidad e incertidumbre, según los estudios publicados en la literatura especializada. Algunos autores reportaron en sus estudios evidencia estadística suficiente para la caracterización de los sobrecostos de los proyectos, no obstante, el conocimiento sobre este fenómeno aún es limitado, específicamente sobre el comportamiento de su variabilidad e incertidumbre. El presente estudio tuvo como objetivo principal caracterizar estadísticamente la magnitud de los sobrecostos reportados en la literatura especializada durante el periodo comprendido entre 1985 y 2018, de acuerdo con el tipo de proyecto de infraestructura y la localización geográfica donde se desarrolló dicho proyecto. De esta manera, con base en 14 estudios metodológicamente seleccionados, fueron conformadas, a su vez, 19 muestras de proyectos para el análisis, con tamaño promedio de 83 proyectos cada una. A partir de estas, los sobrecostos fueron caracterizados cuantitativamente, según el tipo de proyecto en TIP I -proyectos viales de carreteras y autopistas, y TIP II -puentes, túneles y proyectos de vías férreas. Así mismo, se caracterizaron de acuerdo con cinco regiones geográficas: África, Asia, Europa, Norteamérica y Oceanía. Los resultados demostraron que los proyectos tipo TIP II están más propensos a mayores sobrecostos que los proyectos tipo TIP I, y que el sobrecosto está presente en los cinco continentes. Además, los resultados confirmaron que los proyectos desarrollados en África son más propensos a presentar sobrecostos promedio mayores que en las demás regiones analizadas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sobrecostos se presentan con frecuencia a nivel mundial en proyectos de construcción [1]. Algunos autores han encontrado que los sobrecostos ocurren en 3 de cada 5 proyectos y su variabilidad depende, entre otros factores, del tipo proyecto y de la región en la que se desarrollan [2]. Los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial no son la excepción [3]; por ejemplo, Flyvbjerg, Skamris y Buhl [4] observaron que el promedio de sobrecostos en proyectos de vías férreas es de 44,7%; en proyectos de túneles y puentes es de 33,8%; y en proyectos de carreteras es de 20,4%, aproximadamente. Cantarelli, Van Wee, Molin, y Flyvbjerg [3], por su parte, encontraron sobrecostos promedio de 18% en proyectos de carreteras, de 10,6% en proyectos de vías férreas, de 6,5% en proyectos de puentes, y de 35% en proyectos de túneles.

Es evidente que la variabilidad en los sobrecostos se debe a la confluencia de diferentes factores que afectan el buen desarrollo de los proyectos e impiden realizar una buena gestión de sus recursos [5]. Dentro de los factores asociados a los sobrecostos se han identificado algunos como, deficiencias en la gestión del sitio de construcción, en el control y monitoreo de los costos, y en la gestión de información y comunicación del proyecto [6, 7, 8]. Estos factores generan un impacto visible en el plan de ejecución del contratista, en el control efectivo del costo y en la administración general de obra [9]. En proyectos de infraestructura vial los sobrecostos se atribuyen, por ejemplo, a errores, omisiones o cambios en el diseño del proyecto, derivados de la incertidumbre en el alcance y la estrategia de contratación adoptada para este tipo de proyectos. Estos errores, omisiones y cambios de alcance generan una serie de reprocesos en obra que deben ser corregidos, con una incidencia económica entre el 5% y el 20% del valor del contrato [10].

Para contrarrestar los efectos de los factores que generan sobrecostos se requiere de una gestión efectiva y eficiente de los costos en los proyectos [11] a partir de un claro entendimiento del fenómeno. El sobrecosto puede ser definido como una desviación de costos calculada entre el costo final real de construcción del proyecto y la estimación inicial autorizada para el inicio de la construcción [2]. Entender los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial no es una tarea fácil, la disponibilidad de la información para este tipo de estudios es limitada, solo unos pocos estudios proporcionan evidencia estadísticamente significativa de los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial en países económicamente desarrollados, mientras que muy poca evidencia se encuentra en países en vía de desarrollo [12]. Por otra parte, las diferencias metodológicas entre los estudios analizados es notoria; algunos se basan en simples casos de estudio y otros se basan en muestras pequeñas de proyectos, lo cual dificulta realizar un análisis estadístico sistemático [4].

Esta investigación tuvo como objetivo principal analizar la magnitud de los sobrecostos de proyectos de infraestructura vial reportados en la literatura especializada durante el periodo comprendido entre 1985 y 2018. Específicamente el estudio caracterizó estadísticamente la magnitud de los sobrecostos de acuerdo con el tipo de

---

<sup>1</sup> [jhersonbohorquez@gmail.com](mailto:jhersonbohorquez@gmail.com)

<sup>2</sup> [sebastianoviedom@outlook.com](mailto:sebastianoviedom@outlook.com)

<sup>3</sup> [gmejia@uis.edu.co](mailto:gmejia@uis.edu.co)



proyecto y de acuerdo con la ubicación geográfica donde se ejecutó el proyecto. La diversidad encontrada en las metodologías empleadas para estudiar los sobrecostos dificulta el entendimiento de la variabilidad e incertidumbre asociada a estos; por lo tanto, para tener una mejor comprensión de este fenómeno es necesario realizar un estudio que unifique las diferentes metodologías y que analice y caracterice la magnitud de los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial.

## 2. MÉTODO

La metodología de la presente investigación se diseñó siguiendo los lineamientos de la revisión sistemática. Las revisiones sistemáticas aportan de manera relevante a la generación del conocimiento mediante el descubrimiento sistemático de patrones y tendencias, de forma objetiva, a través de múltiples investigaciones primarias sobre un tema específico [13]. El proceso de una revisión sistemática requiere de 5 pasos principales: 1) Establecer el objetivo de la revisión; 2) Identificar estudios relevantes; 3) Evaluar la calidad de los estudios; 4) Sintetizar la evidencia; e 5) Interpretar los resultados [14].

La revisión sistemática del presente estudio siguió los pasos enunciados a continuación: en primer lugar, se formuló el objetivo de la revisión; luego, se definieron los criterios de búsqueda y selección de artículos científicos que sirvieran de apoyo a este estudio; después, se codificaron y tabularon las características encontradas en los estudios para evaluar y sintetizar la información, y a través del análisis e interpretación de los resultados se dio respuesta a los objetivos de este estudio para establecer las respectivas conclusiones.

Como objetivo de la revisión sistemática en esta investigación, se planteó encontrar evidencia cuantitativa de estudios de sobrecostos en proyectos de infraestructura vial. Con base en este objetivo, se identificaron las variables que describieran la información de evidencia requerida para la caracterización de los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial, de acuerdo con el tipo de proyecto y con la localización geográfica.

La definición de los criterios de búsqueda y selección de artículos se realizó a partir de una revisión previa de la literatura haciendo uso de ecuaciones booleanas en las siguientes bases de datos: ASCE, EBSCO, Emerald, Science Direct, Springer, Taylor & Francis y Web of Science. Las ecuaciones booleanas se definieron a partir de las siguientes palabras claves en inglés: “*cost overrun*”, “*cost underrun*”, “*cost deviation*”, “*cost growth*”, “*construction projects*” y “*engineering projects*”. La búsqueda de artículos se acotó en el tiempo para el período 1985-2018 y se obtuvo una muestra de 165 artículos. Se utilizaron criterios de exclusión en la búsqueda de nuevas evidencias como la posibilidad de descargar el artículo para su análisis, artículos en idiomas diferentes al español o al inglés y artículos publicados que no fueron sometidos a un proceso de revisión a ciegas por parte de pares especializados (Figura 1).

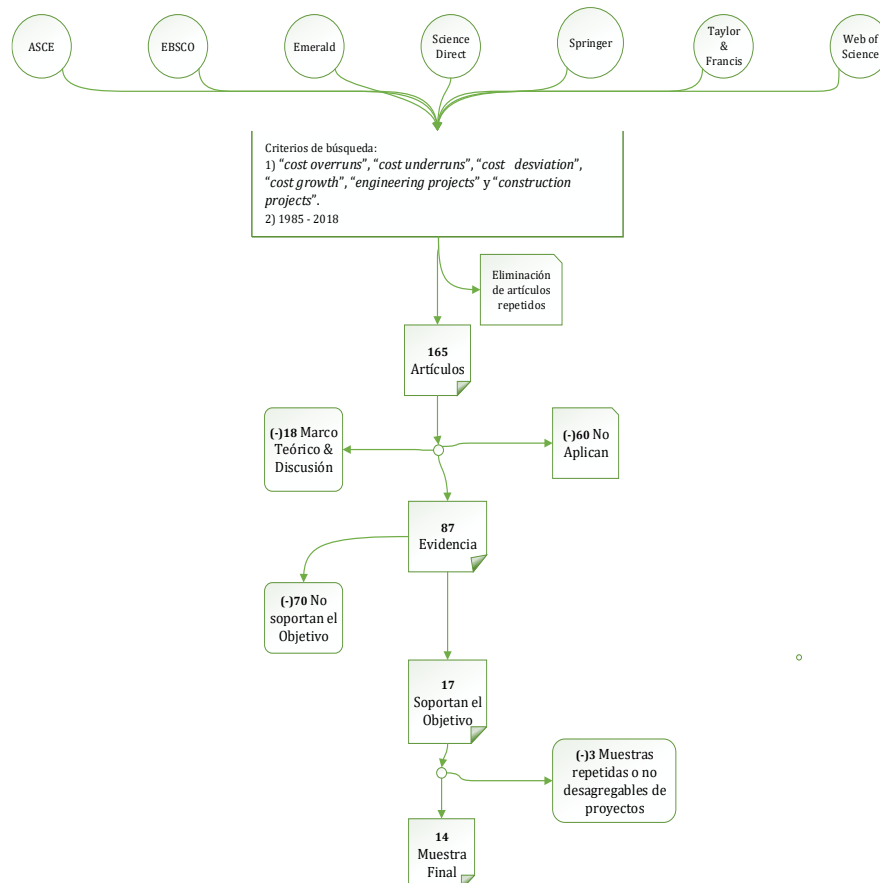


Figura 6. Flujo de selección de artículos para la muestra final

Una posterior revisión de la relevancia de los estudios llevó a descartar artículos que no aportaban al cumplimiento del objetivo de la presente investigación; lo cual permitió consolidar una muestra final de 14 artículos con evidencia cuantitativa de sobrecostos que contenían 19 muestras con proyectos, para un total de 1.586 proyectos de construcción de infraestructura vial analizados en este estudio (Tabla 1).

**Tabla 5.** Composición de la muestra del estudio

Referencia	Muestras	Proyectos	Año	Revista
[15]	1	219	2005	Journal of Construction Engineering and management
[16]	2	50	2010	
[17]	1	236	2013	
[18]	1	7	2014	KICEM Journal of Construction Engineering and Project Management
[1]	1	620	2004	Transport Policy
[3]	2	78	2012	
[4]	4	242	2003	Transport Reviews
[19]	1	11	2003	Construction Management and Economics
[5]	1	8	2009	International Journal of Project Management
[20]	1	7	2011	Proceedings of the 2011 IEEE IEEM
[12]	1	36	2012	Transportation
[10]	1	8	2014	Journal of Civil Engineering and Management
[21]	1	49	2015	Journal of Infrastructure Systems
[22]	1	15	2017	Transportation Research Part A

Las 19 muestras extraídas de los artículos seleccionados fueron tabuladas de acuerdo con el año en que fueron publicados; su composición se muestra en la Tabla 2. Además, se clasificaron de acuerdo con la localización geográfica donde los proyectos fueron ejecutados (Tabla 3).

**Tabla 6.** Composición de la muestra de acuerdo con la fecha de publicación

Período	Muestras	%
2003 - 2007	7	37%
2008 - 2012	7	37%
2013 - 2017	5	26%

**Tabla 7.** Composición de las muestras de proyectos analizados de acuerdo con el continente

Continente	Muestras	%	Proyectos
África	2	11%	15
Asia	1	5%	7
Europa	8	42%	934
Norte América	4	21%	516
Oceanía	4	21%	114

En este estudio se propusieron cinco regiones geográficas: África, Asia, Europa, Norteamérica y Oceanía. El tamaño promedio de las muestras de proyectos de infraestructura vial analizados fue de 83 proyectos para cada una de las 19 muestras tomadas. En la tabla 3 se observa que la región donde se realizaron estudios con mayor número de proyectos analizados fue Europa (42%, 934/1586), y las regiones con menor número de proyectos analizados fueron África (11%, 15/1.586) y Asia (5%, 7/1.586).

### 3. RESULTADOS

El estudio analizó las 19 muestras tomadas para clasificar los proyectos de acuerdo con el tipo de construcción de infraestructura. Los proyectos analizados en la muestra fueron desagregados y clasificados de acuerdo con dos tipos de proyectos de infraestructura vial (TIP I y TIP II). En TIP I, se incluyeron proyectos de carreteras y autopistas, y en TIP II, túneles, puentes y vías férreas. Con base en esta clasificación se agregaron estadísticamente las medidas de media y desviación y se encontró que el sobrecosto promedio fue de 9,6% y 26,9% y la desviación estándar fue de 26,7% y 48,0% para TIP I y TIP II respectivamente (Tabla 4).

**Tabla 8.** Caracterización de los sobrecostos de acuerdo con el tipo de proyecto

Tipo	Proyectos	% Sobrecosto	Desviación Estándar (%)	Coficiente de Variación
TIP I	1.437	9,6	26,7	2,8
TIP II	149	26,9	48,0	1,8

\*TIP (Transport Infrastructure Project)

Una vez fueron desagregadas las muestras en TIP I y TIP II se consolidaron por región geográfica, y se calculó el sobrecosto promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada continente y tipo de proyecto (Tabla 5). En África se encontró que para proyectos TIP I el sobrecosto promedio fue de 48,6% con desviación estándar de 63,9%, y para TIP II no se hallaron muestras. En Asia, para TIP I no se hallaron muestras, mientras que para TIP II el sobrecosto promedio fue de 1,1% con desviación estándar de 1,1%. En Europa, para TIP I el sobrecosto promedio fue de 11,8% y la desviación estándar de 30,6%, y para TIP II, el sobrecosto promedio fue de 25,8% y la

desviación estándar de 42,0%. En Norte-América, para TIP I, el sobrecosto promedio fue de 3,8% y la desviación estándar de 14,0% y para TIP II, el sobrecosto promedio fue de 33,5% y la desviación estándar de 56,3%. Finalmente, en Oceanía, para TIP I, el sobrecosto promedio fue de 13,6% y la desviación estándar de 11,9%, y para TIP II, el sobrecosto promedio fue de 27,7% y la desviación estándar de 47,6% (Tabla 5).

**Tabla 9.** Caracterización de los sobrecostos de acuerdo con la localización geográfica

Continente	Tipo	Proyectos	% Sobrecosto promedio	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de Variación
África	TIP I	15		48,6	63,9
	TIP II	-		-	-
	Total	15		48,6	63,9
Asia	TIP I	-		-	-
	TIP II	7		1,1	1,1
	Total	7		1,1	1,1
Europa	TIP I	855		11,8	30,6
	TIP II	79		25,8	42,0
	Total	934		12,9	31,9
Norte América	TIP I	479		3,8	14,0
	TIP II	37		33,5	56,3
	Total	516		6,0	21,6
Oceanía	TIP I	88		13,6	11,9
	TIP II	26		27,7	47,6
	Total	114		16,8	30,9

Una vez realizado y reportado el análisis de la estadística descriptiva de las muestras de los proyectos, el presente estudio caracterizó las muestras haciendo inferencia estadística de los valores de los sobrecostos promedios de las muestras a la población, de acuerdo con el tipo de proyecto, con un intervalo de confianza (IC) del 95%. De acuerdo con la clasificación de los proyectos, se encontró que en proyectos de infraestructura vial TIP I se espera encontrar un valor de sobrecostos promedio entre 8,2% y 11,0%; y en proyectos TIP II sobrecostos promedio entre 19,1% y 34,7% (Tabla 6).

**Tabla 10.** Intervalos de confianza de acuerdo con el tipo de proyecto

Tipo	% Sobrecosto promedio	SE_M (%)	IC 95% LL	IC 95% UL
TIP I	9,6	0,7	8,2	11
TIP II	26,9	3,9	19,1	34,7

La caracterización de las muestras de acuerdo con la localización geográfica (Tabla 5), mostró que África es el continente donde se presenta mayor sobrecosto en proyectos de infraestructura vial, con un valor de sobrecosto promedio de 48,6% y la desviación estándar de 63,9%. En Asia, el sobrecosto promedio fue de 1,1% y la desviación estándar de 1,1%. En Europa, el sobrecosto promedio fue de 12,9% y la desviación estándar de 31,9%. En Norte-América sobrecosto promedio fue de 6,0% y la desviación estándar de 21,6%. Finalmente, en Oceanía, el sobrecosto promedio fue de 16,8% y la desviación estándar de 30,9%. Posteriormente, se caracterizaron las muestras haciendo inferencia estadística de los valores de los sobrecostos promedios de las muestras a la población, de acuerdo con la localización geográfica, con un intervalo de confianza del 95%. Se encontró que para África el valor esperado de sobrecostos oscila entre 13,2% y 83,9%; para Asia, entre 0,1% y 2,2%; para Europa, entre 10,9% y 15,0%; para Norte-América, entre 4,1% y 7,8%; y finalmente, para Oceanía, entre 11,0% y 22,5% (Tabla 7).

**Tabla 7.** Intervalos de confianza de acuerdo con la localización geográfica

Continente	Tipo	% Sobrecosto promedio	SE_M (%)	IC 95% LL	IC 95% UL
África	TIP I	48,6	16,5	13,2	83,9
	TIP II	-	-	-	-
	Total	48,6	16,5	13,2	83,9
Asia	TIP I	-	-	-	-
	TIP II	1,1	0,4	0,1	2,2
	Total	1,1	0,4	0,1	2,2
Europa	TIP I	11,8	1,1	9,7	13,8
	TIP II	25,8	4,7	16,4	35,2
	Total	12,9	1,0	10,9	15,0
Norte América	TIP I	3,8	0,6	2,6	5,1
	TIP II	33,5	9,3	14,7	52,2
	Total	6,0	1,0	4,1	7,8
Oceanía	TIP I	13,6	1,3	11,0	16,1
	TIP II	27,7	9,3	8,5	47,0

#### 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El presente estudio identificó investigaciones previas con similares resultados que sirven como referentes para realizar una comparación y discusión. Cantarelli et al. [3] con 78 proyectos de la región de Europa y Flyvbjerg et al. [4] con 258 proyectos a nivel mundial (Europa, Norte América y otros) estudiaron los sobrecostos en proyectos de

infraestructura vial subdividiendo estos proyectos en carreteras, vías férreas, puentes y túneles, y a este nivel de desagregación, encontraron que el sobrecosto varía según el tipo de proyecto. Al analizar los resultados de la presente investigación y compararlo con los estudios de Cantarelli et al. y Flyvberg et al., se observa la misma tendencia. Para proyectos TIP I (carreteras y autopistas) el presente estudio espera encontrar sobrecostos promedio a nivel mundial entre 8,2% y 11% con un IC del 95%. Para proyectos TIP II (túneles, puentes y vías férreas), el presente estudio espera encontrar sobrecostos promedio a nivel mundial entre 19,1% y 34,7% con un intervalo de confianza IC del 95%. Se puede decir de forma cualitativa y cuantitativa que el comportamiento de los sobrecostos de los proyectos TIP II es diferente a los sobrecostos en los proyectos TIP I, mostrando mayores sobrecostos los TIP II que los de TIP I.

Se puede afirmar que son diferentes, de acuerdo con la evidencia estadística, ya que los límites de los intervalos de confianza no se traslapan; el límite superior de proyectos TIP I es 11% y el límite inferior de proyectos TIP II es 19,1%. Desde un punto de vista general el propósito principal de estos proyectos es la conectividad, pero al compararlos cualitativamente estos proyectos requieren de distintos esfuerzos, tiempos y costos para ser construidos; los proyectos de tipo TIP II (puentes, túneles y vías férreas) son proyectos más complejos de desarrollar, que requieren de un trabajo ingenieril mayor que los proyectos de TIP I (carreteras y autopistas), por tanto, generalizar y agrupar estos proyectos en una sola categoría (proyectos de infraestructura vial) sesgaría el impacto que tienen estos tipos proyectos en el fenómeno de los sobrecostos.

En los sobrecostos analizados en este estudio se observa que estos están presentes en proyectos grandes y pequeños, aunque los proyectos de gran magnitud presentan más riesgo e incertidumbre y son propensos en mayor medida a generar sobrecostos [3]. También se observa con los resultados, que los sobrecostos (desviaciones de costo mayores al 0%) es un fenómeno presente en todas las regiones; de acuerdo con Flyvberg et al. el incremento del costo está presente en los 5 continentes, representando un fenómeno global, además el sobrecosto ocurre de forma más frecuente en naciones en desarrollo que en países desarrollados [4]. Al analizar los sobrecostos por región se encontró que África solo presentaba evidencia de proyectos de TIP I y Asia proyectos de TIP II por lo que generalizar el comportamiento de los sobrecostos en la población a partir de estas dos regiones no es adecuado por la falta de datos. Aunque a nivel mundial se observa que, en las regiones de Europa, Norte-América y Oceanía los proyectos TIP II en promedio tuvieron mayores sobrecostos que los proyectos TIP I, es decir, se presenta la misma tendencia de comportamiento ya mostrada en el párrafo anterior en la agregación realizada únicamente por tipo de proyecto, dando un indicio de que posiblemente en Asia y África puede suceder lo mismo.

Por otra parte, los intervalos de confianza calculados evidencian la variabilidad presente en proyectos de infraestructura vial; esta es apreciable en África donde se presenta una gran separación entre los extremos de los intervalos de confianza y una desviación estándar del 63,9%, lo cual representa una alta variabilidad en los sobrecostos promedio presentes en proyectos desarrollados en esa región. En Asia se espera encontrar sobrecostos promedio entre 0,1% y 2,2% con una desviación estándar para la media (1,1%) de 1,1%. Al comparar África y Asia, en cuanto a variabilidad, se observa que en Asia es mucho menor, pero hay otro factor que afecta esta variabilidad, el número de proyectos encontrados en estas regiones es de menos de 30 proyectos lo cual dificulta realizar comparaciones con estos estudios.

En Europa, Norteamérica y Oceanía no hubo una variación considerable al observar la distancia entre los límites de los IC lo cual representa que el sobrecosto promedio esperado en esas regiones estará cercano al sobrecosto promedio obtenido en el presente estudio, otra particularidad que destaca la poca variabilidad es que para estas tres regiones el número de proyectos analizados fue de 934, 516 y 114 para Europa, Norteamérica y Oceanía, respectivamente. Sin embargo, no es posible realizar un análisis de sobrecostos promedio a nivel global debido a la gran variación que se presenta entre las regiones como se muestra en los resultados de la Tabla 7, es decir, no se puede decir a simple vista observando el traslape entre los intervalos de confianza si los sobrecostos varían de un continente a otro.

En algunos casos los sobrecostos presentan valores extremos que afectan el comportamiento promedio de las muestras generando variación en la distribución de estos y empujando la media a un valor que no es representativo por el sesgo que genera, además se asumió para el estudio que los sobrecostos se distribuyen normalmente, la principal razón para asumir normalidad, radica en la falta de información dentro de los artículos publicados a cerca de la distribución de la muestra, además que esta asunción facilita la comparación de los resultados; en ese orden de ideas se aclara que para la muestra tomada del estudio realizado por Love et al. en el año 2017 fue necesario descartar 1 proyecto para el cálculo del sobrecosto promedio, ya que presentaba un valor extremo que afectaba en gran medida el promedio de los sobrecostos.

## 5. CONCLUSIONES

La presente revisión categorizó los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial ejecutados en cinco regiones geográficas, cuya composición para el análisis fue: África (11%), Asia (5%), Europa (42%), Norteamérica (21%) y Oceanía (21%). Con base en la información analizada en los distintos estudios, se pudo observar que la mayoría de los artículos no reportaban de manera amplia la de estadística básica, necesaria para hacer una interpretación y análisis completo sobre las muestras de proyectos seleccionados de esta forma se evidencia una necesidad de generar cultura de reporte estadístico de las muestras de los estudios para así facilitar la comparación posterior entre ellos.

Para entender mejor el comportamiento del fenómeno de los sobrecostos en proyectos de infraestructura vial es necesario generar un estándar de calidad y formar una cultura en torno a las publicaciones de estudios relacionados con este tema, donde se evidencie un conjunto de estadísticas básicas que representen la tendencia central y la variación de los datos. En ese orden de ideas, se debe reportar además del promedio, otros indicadores de tendencia central como la mediana, así como también indicadores de variabilidad diferentes a la desviación estándar como son el rango, los cuartiles, valores mínimos y máximos y la distribución de la muestra.

En este estudio se encontró que los sobrecostos están presentes en los cinco continentes pudiéndose afirmar que es un fenómeno global del cual se tienen pocos estudios con información relevante para realizar un análisis completo que represente este fenómeno. Además, se encontró que los proyectos de tipo TIP II (puentes, túneles y vías férreas) presentaron mayores sobrecostos que los de tipo TIP I (autopistas y carreteras), este fenómeno fue evidenciado en Europa, Norteamérica y Oceanía. Sin embargo, en África y Asia no fue posible analizar este comportamiento de forma relevante ya que solo se encontraron muestras para proyectos de tipo TIP I y TIP II respectivamente, además el tamaño de muestra de estas dos regiones es muy bajo en comparación con los demás continentes. En Europa se encontraron 934 (58,9%) proyectos, siendo así la región que reportó la mayor cantidad de proyectos que dieron soporte al presente estudio, seguida de Norteamérica con 516 (32,5%) proyectos, Oceanía con 114 (7,2%) proyectos, África con 15 (1,0%) proyectos y Asia con 7 (0,4%) proyectos, para un total de 1586 (100%) proyectos. A tamaños de muestra grande se observó menor variabilidad de los sobrecostos respecto al promedio.

## REFERENCIAS

- [1] Odeck, J. (2004). Cost overruns in road construction - what are their sizes and determinants? *Transport Policy* 11(1), 43-53.
- [2] Mejía, G., Leguizamo, E. & Hernández, R. (2017). Caracterización de los sobrecostos en proyectos de construcción de acuerdo con la localización geográfica: Una revisión sistemática entre 1985 y 2016. *Revista Actas Ingeniería* 3, 24-35.
- [3] Cantarelli, C. et al. (2012). Different cost performance: Different determinants?. The case of cost overruns in Dutch transport infrastructure projects. *Transport Policy* 22, 88-95.
- [4] Flyvbjerg, B., Skamris, M. & Buhl, S. (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews* 23(1), 71-88.
- [5] Kaliba, C., Muya, M. & Mumba, K. (2009). Cost escalation and schedule delays in road construction projects in Zambia. *International Journal of Project Management* 27(5), 522-531.
- [6] Memon, A. & Rahman, I. (2013). Analysis of Cost Overrun Factors for Small Scale Construction Projects in Malaysia Using PLS-SEM Method. *Modern Applied Science* 7(8), 78-88.
- [7] Doloi, H. (2013). Cost Overruns and Failure in Project Management: Understanding the Roles of Key Stakeholders in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 3, 267-280.
- [8] Park, Y. & Papadopoulou, T. (2012). Causes of cost overruns in transport infrastructure projects in Asia: Their significance and relationship with project size. *Built Environment Project and Asset Management* 2(2), 195-216.
- [9] Mansfield, N., Ugwu, O. & Doran, T. (1994). Causes of delay and cost overruns in Nigerian construction projects. *International Journal of Project Management* 12(4), 254-260.
- [10] Forcada, N. et al. (2014). Rework in highway projects. *Journal of Civil Engineering and Management* 20(4), 445-465.
- [11] Ali, A. & Kamaruzzaman, S. (2010). Cost performance for building construction projects in Klang Valley. *Journal of Building Performance* 1(1), 110-118.
- [12] Makovšek, D., Tominc, P. & Logožar, K. (2012). A cost performance analysis of transport infrastructure construction in Slovenia. *Transportation* 39(1), 197-214.
- [13] Borrego, M. et al. (2014). Systematic literature reviews in engineering education and other developing interdisciplinary fields. *Journal of Engineering Education* 103(1), 45-76.
- [14] Khan, K. & Kunz, R. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine* 96, 118-121.
- [15] Nassar, K., Nassar, W. & Hegab, M. (2005). Evaluating Cost Overruns of Asphalt Paving Project Using Statistical Process Control Methods. *Journal of Construction Engineering and Management* 131(11), 1173-1178.
- [16] Love, P. et al. (2010). Rework in Civil Infrastructure Projects: Determination of Cost Predictors. *Journal of Construction Engineering and Management* 136(3), 275-282.
- [17] Shrestha, P., Burns, L. & Shields, D. (2013). Magnitude of construction cost and schedule overruns in public work projects. *Journal of Construction Engineering* 2013(2), 1-9.
- [18] Rwakarehe, E. & Mfinanga, D. (2014). Effect of Inadequate Design on Cost and Time Overrun of Road Construction Projects in Tanzania. *Journal of Construction Engineering and Project Management* 4, 15-28.
- [19] Langford, D. et al. (2003). Comparison of construction costs on motorway projects using measure and value and alternative tendering initiative contractual arrangements. *Construction Management and Economics* 21(8), 831-840.
- [20] Ramanathan, C. Potty, N. & Idrus, A. (2011). Risk factors influencing time and cost overrun in multiple D & B projects in Malaysia: A case study. In *Proceedings of the 2011 IEEE IEEM*.
- [21] Love, P. et al. (2015). Estimating Construction Contingency: Accommodating the Potential for Cost Overruns in Road Construction Projects. *Journal of Infrastructure Systems* 21(2), 401-403.
- [22] Love, P. et al. (2017). Off the rails: The cost performance of infrastructure rail projects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 99, 14-29.

# Gestión Integral del Riesgo Sísmico en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente

Oscar F. Rosas C.<sup>1</sup>  
SENA – CTCM  
Bogotá – Colombia

La posibilidad de afectación por eventos sísmicos en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente; es una problemática que demanda gran atención, pues puede causar pérdidas significativas en la población colombiana. La implementación de un sistema integral de gestión del riesgo sísmico en viviendas de dicho tipo, puede advertir sobre alternativas para la protección, el reforzamiento y la reconstrucción de las mismas; en consecuencia, se pueden reducir las pérdidas generadas tras la ocurrencia de un terremoto. El proceso de evaluación, modelación y simulación de prototipos con las diferentes herramientas que se encuentran disponibles en el CTCM del SENA; permiten ilustrar el comportamiento de las viviendas vulnerables tras la ocurrencia de un evento sísmico y sustentan la metodología para la implementación de un sistema integral de gestión del riesgo en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente. Como producto de investigación se ha establecido una metodología para la implementación de un sistema integral de gestión del riesgo sísmico compuesto por los siguientes procesos:

- Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente.
- Estimación de posibles daños en viviendas vulnerables.
- Acciones para reducir el riesgo sísmico en viviendas vulnerables.
- Preparación para la respuesta y reconstrucción de viviendas afectadas por terremotos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia está localizada al noroccidente de Suramérica, sobre la línea del Ecuador y justo en la zona de interacción de las placas Nazca, Sudamericana y Caribe donde la dinámica tectónica y los eventos sísmicos son activos. Debido a que la mayoría de la población colombiana se encuentra concentrada en grandes ciudades localizadas en zonas de mayor amenaza o peligro sísmico, el potencial de desastres por terremoto para el país resulta significativamente alto [1]. Los estudios de ingeniería sísmica en el país son relativamente recientes, y la mayoría de las viviendas son de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente; por ello, la mayor parte de la población es altamente vulnerable, abriendo la posibilidad a que se presenten graves daños como consecuencia de un evento sísmico.

Además de las pérdidas materiales, un terremoto en un país que no ha desarrollado medidas preventivas, trae consigo consecuencias psico-sociales y políticas que afectan a la población y agudizan su problemática. Si el estado con sus autoridades, comunidades y gremios no ha previsto normas y metodologías para atender la emergencia, la situación se agrava y las consecuencias del evento empeoran, generando un colapso social del cual es difícil recuperarse en un corto plazo [2]. Conscientes de la problemática expuesta, el grupo de investigación del CTCM SENA Bogotá en su línea de simulación sísmica, ha decidido promover la concientización entre profesionales, maestros, oficiales, ayudantes y personal activo del sector constructor.

Esta concientización implica un proceso de desaprender – reaprender. Desaprender prácticas perjudiciales establecidas en obra, que mantiene a los actores de la construcción en una zona de comodidad donde se cree estar haciendo las cosas bien sin fundamentos técnicos y basados en su propia experiencia. Aprender a ejecutar las actividades de forma adecuada, mediante la aplicación de conocimientos técnicos vigentes y dispuestos a actualizarse, con el propósito de garantizar la protección de los colombianos y de sus viviendas. Por tal motivo se ha propuesto la implementación de cursos, manuales, cartillas y eventos académicos entre especialistas, funcionarios, científicos, constructores, contratistas y otros actores que tienen en su accionar cotidiano el estudio y ejecución de actividades relacionadas con construcciones que garanticen la vida y la propiedad de la población colombiana en el marco de la gestión integral del riesgo sísmico en viviendas de construcción progresiva y espontánea no sismo resistente. La propuesta está compuesta por los siguientes temas:

- Generalidades y conceptos relacionados con el riesgo sísmico.
- Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente.
- Implementación de modelos vulnerables.
- Simulación sísmica con modelos vulnerables.
- Mejoramiento de modelos – Reducción del riesgo.
- Simulación sísmica con modelos mejorados.
- Comparación de resultados.
- Estrategias para la respuesta después de un terremoto.
- Evaluación e inspección de viviendas después de un sismo.
- Reconstrucción de viviendas.

---

<sup>1</sup> ofrosasc@gmail.com

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 Manual técnico de capacitación – construcciones menores sismo resistentes**

En 1999 el SENA presentó un Manual de Construcciones Sismo Resistentes, concebido como un libro de consulta para profesionales y técnicos de la construcción que diseñan y dirigen la ejecución de los proyectos de vivienda y también para aquellos que se están iniciando en la actividad. Considerado como un aporte del SENA a los esfuerzos realizados por el Gobierno Nacional y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica para educar a sus agentes en la organización y aplicación de medidas de prevención en la construcción, que puedan disminuir en gran medida los daños, pérdidas humanas y materiales provocadas por estos fenómenos imprescindibles [3].

### **2.2 Mesa vibratoria del laboratorio de modelos estructurales de la Universidad de los Andes**

En el laboratorio de modelos estructurales de la Universidad de los Andes se realiza investigación experimental sobre sistemas y componentes de estructura, con el fin de evaluar su comportamiento y sus materiales bajo diferentes solicitaciones de carga. La infraestructura única con la que cuenta este laboratorio, permite realizar ensayos en tamaño real y a escala sobre modelos estructurales, no solo bajo cargas estáticas, usando actuadores hidráulicos servo-controlados, sino también simulando cargas dinámicas como sismos mediante equipos como la mesa vibratoria de gran tamaño. Este simulador sísmico unidireccional, cuenta con un área de ensayo de 4,5 X 4,5 metros y un actuador dinámico de 60 toneladas de capacidad con una frecuencia máxima de operación de 30 Hz, el cual permite realizar ensayos dinámicos a gran escala (1:1 a 1:4) de estructuras de hasta 3 pisos de altura [4]. La construcción de esta mesa se llevó más de diez años de planeación, tiempo en el que los ingenieros estuvieron inmersos en modelos físicos, pruebas matemáticas, ecuaciones, hasta que la idea se materializó en 2004 [5].

### **2.3 Laboratorio de investigación en ingeniería sísmica de la Universidad EAFIT**

La mesa vibratoria nace a finales del año 2005 como un proyecto de investigación confinado por la universidad EAFIT, Colciencias, y la industria del sector de la construcción Lunsa, Anfalit, Cementos del Cairo, Indural y Concretodo; es única en el país como equipo para el estudio de la respuesta sísmica de sistemas estructurales. El laboratorio de investigación en ingeniería sísmica está ubicado en el bloque 21 y cuenta con un área de 315 m<sup>2</sup>. El laboratorio es un espacio destinado para la investigación y estudio de la respuesta sísmica de diferentes sistemas estructurales utilizados en la construcción de obras civiles; utilizando básicamente la mesa vibratoria con una plataforma metálica de 70 toneladas, altura libre de 9,5 m, sistema motriz hidráulico con movimiento de 0,2 Hz, velocidad máxima de 80 cm/s y desplazamiento máximo de 10 cm, todo controlado por un sistema electrónico de alta precisión desarrollado en su mayor parte por personal de la Universidad y empresas nacionales. Para satisfacer los requerimientos en los diferentes servicios que atiende, el Laboratorio cuenta con los siguientes equipos y materiales: Mesa Sísmica (vibratoria 32 m<sup>2</sup>), Acelerómetros, Transductores de información [6].

### **2.4 Evaluación de vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería en estratos uno y dos según tipificación de la estructura**

En el año 2006, los estudiantes Jairo Andrés Giraldo Galvis y David Mauricio Méndez Nivia presentaron la tesis para optar por el título de ingeniero civil de la Universidad de los Andes. Después de realizar una evaluación detallada en viviendas de mampostería en los estratos uno y dos recomendaron:

*Tener en cuenta que en la realidad muchas construcciones se hacen de la manera que se hicieron para este proyecto, ya que en muchas ocasiones son los mismos propietarios quienes construyen sus casas, sin ningún conocimiento de ingeniería. Esta situación no va a cesar ni en el corto, ni mediano plazo, por lo cual es urgente llevar a cabo una estrategia para poder informar de cierta manera a las personas que están bajo este riesgo. Esta estrategia además de informar sobre los peligros que corren este tipo de estructuras, debe brindar conocimientos sobre los parámetros mínimos necesarios para llevar a cabo la construcción de edificaciones resistentes a sismos en mampostería no reforzada, para que de esta forma si una persona se ve obligada a construir su propia vivienda no corra el peligro que están corriendo actualmente al usar de manera inadecuada este sistema constructivo [7].*

### **2.5 Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009**

En el año 2009 la asociación colombiana de ingeniería sísmica AIS con el apoyo técnico de: la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad EAFIT; publicaron un Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. El propósito de la investigación fue la actualización de un estudio publicado en 1996, con el fin de aportar los valores de amenaza sísmica para todos los municipios de Colombia requeridos para la expedición de la nueva versión del reglamento de construcción sismo resistente de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR 10 [8].

### **2.6 Bogotá frente a la gestión integral del riesgo sísmico**

En Bogotá en el año 2010, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE; presentó un trabajo desarrollado por profesionales quienes, con una mirada holística de la problemática, expusieron en cada uno de los campos, los aspectos de avance conjunto (comunidad – estado) así como las diferentes variables técnicas, sociales, culturales, metodológicas, educativas y operativas que hasta la fecha han permitido a la ciudad tomar decisiones



frente a la gestión integral del riesgo sísmico. La publicación es una muestra del compromiso que la ciudad de Bogotá ha tenido para que los efectos del cambio climático, la ocurrencia de desastres naturales y en general las situaciones de emergencia, sean atendidas como temáticas indispensables en los programas de gobierno encaminados a un mejor vivir de las generaciones presente y futuras [9].

## **2.7 Evaluación de la amenaza sísmica en Colombia**

En el año 2010, la Universidad de los Andes realizó una publicación sobre la Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia resumida de la siguiente forma:

*La disponibilidad de modelos y técnicas de cálculo más refinadas para la evaluación de la amenaza sísmica, así como la existencia de una mayor cantidad de registros de eventos sísmicos, permiten realizar una actualización de los estudios de amenaza sísmica a nivel nacional. Este artículo describe la nueva metodología utilizada para estimar diferentes intensidades sísmicas esperadas para diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes en el territorio colombiano. Se presentan los resultados de intensidad obtenidos para los diferentes períodos de retorno y ordenadas espectrales para edificaciones de diferentes períodos estructurales, los cuales, además de servir para establecer los valores de diseño en las nuevas Normas NSR - 10, también son un insumo necesario para la realización de estudios de microzonificación y de riesgo sísmico dentro del territorio nacional de la República de Colombia [10].*

## **2.8 Evolución del sistema nacional de gestión del riesgo de desastres**

En 1985 el país vivió una de las catástrofes más dolorosas, desde la avalancha de Armero generada por el volcán Nevado del Ruiz, Colombia tuvo la necesidad inminente de crear un sistema que coordinara la respuesta a los desastres que dependiera de la Presidencia de la República, con la Ley 42 del 02 de noviembre de 1988 se crea el Sistema Nacional para la Atención y Prevención de Desastres y también nace la oficina nacional para la atención de desastres; así se coordinó la atención de las emergencias que se presentaron durante ese año; luego con el Decreto - Ley 919 de 1989 se organiza el Sistema Nacional para la Atención y Prevención de Desastres, y la Dirección Nacional para la Atención de Desastres adscrita al Ministerio del Interior que continuó con la atención de los colombianos afectados por las diversas emergencias. En la actualidad el gobierno incluyó el tema de gestión del riesgo en su plan de desarrollo, lo que se hizo evidente en la creación de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD adscrita a la Presidencia de la República y la proclamación de la política nacional que define las acciones del sistema coordinado por la unidad mediante la ley 1523 del 24 de abril de 2012 [11].

## **2.9 Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años después de su primera expedición**

En 2014 García [12] publicó un artículo en el cual se habla sobre el desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición resumida así:

*El Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes expedido por medio del Decreto-Ley 1400 de 1984 fue un primer intento de normalización del diseño y construcción de estructuras en el medio nacional y estuvo vigente durante 14 años. Después, fue aprobada por el Congreso de la República la Ley 400 de 1997, al amparo de la cual se expidieron los Reglamentos de Construcción Sismo Resistente NSR-98 (1998), que sustituyó al Código de 1984 y la actualización expedida en el 2010 como Reglamento NSR-10, hoy vigente. En este artículo se hace un breve resumen del contenido de la reglamentación sismo resistente colombiana, sus aciertos y aspectos que aún faltan por implementar. Además, se hace un análisis de los aspectos jurídicos que le afectan cómo la reciente Ley de Bomberos, la microzonificación de ciudades intermedias y grandes, la rehabilitación sísmica de edificaciones indispensables y de atención a la comunidad, entre otros.*

## **2.10 Propuesta SENA**

Los estudios actuales son claros al identificar que el 87% de la población colombiana habita en zonas de amenaza sísmica alta o intermedia. Aunque se tiene dicho conocimiento, la mayoría de los estudios apuntan a la preparación para la respuesta ante un terremoto; sin embargo, hay otro enfoque que no ha sido muy explorado y apunta a la reducción de la vulnerabilidad en infraestructura para vivienda ante un evento sísmico. En consecuencia, surge la necesidad de establecer una metodología para la implementación del sistema integral de gestión del riesgo ante eventos sísmicos con un enfoque directo a la protección, reforzamiento y/o reconstrucción de viviendas que se han levantado de forma espontánea y progresiva con técnicas no sismo resistentes.

# **3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

## **3.1 Estructura interna de la tierra**

Estudios sísmicos han evidenciado la existencia de tres fases generales que constituyen la estructura de la tierra (corteza, manto y núcleo); las diferencias en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada fase tienen relación directa con su composición química. Adicionalmente se han establecido subdivisiones a partir de las “propiedades del estado físico de los materiales (grados de rigidez o fluidez) en relación con el aumento de presión y temperatura con la profundidad” [13]. En la Figura 1 se pueden observar las subdivisiones mayores de la tierra en relación con la profundidad a la cual se localizan las fases y a la velocidad de propagación de las ondas. Así como, su porcentaje de ocupación en volumen.

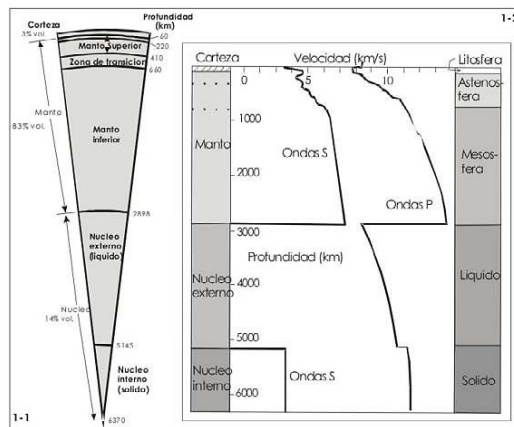


Figura 1. Subdivisiones mayores de la tierra [14]

### 3.2 Concepto de sismo

Las características que se presentan a continuación describen el comportamiento de un sismo:

- Movimiento violento de la corteza terrestre.
- Se origina como consecuencia de una liberación de energía en el interior de la tierra.
- Se transporta en forma de onda sísmica.

La mayoría de los sismos son de baja magnitud que no llegan a generar daños en superficie, cuando un sismo genera daños se denomina terremoto [15]. Al lugar de la corteza donde se presenta la súbita liberación de la energía generada por el rozamiento entre bloques, se le denomina foco sísmico o hipocentro. El foco sísmico se convierte en el centro de la perturbación mecánica y desde allí se inicia la irradiación de la energía. Al punto de la Tierra ubicado directamente sobre el foco sísmico, se le denomina epicentro del terremoto [16].

### 3.3 Riesgo sísmico

El *riesgo sísmico* es la posibilidad de que ocurran en un lugar específico daños a las construcciones, afectaciones a la población y pérdidas económicas por un evento sísmico (terremoto). Para estimar el nivel de riesgo sísmico en un lugar hay varias metodologías que en general tienen en cuenta tres componentes básicas que son la amenaza, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta. La *amenaza sísmica* se define usualmente en términos de la probabilidad de ocurrencia, sin embargo, también se puede determinar de manera determinística para una fuente sísmica particular, que el valor de la amenaza será función principalmente del ambiente sismo tectónico de la zona y las condiciones locales de los suelos. La *vulnerabilidad sísmica* de los elementos expuestos representa la capacidad del elemento para resistir daño o afectación frente a la amenaza sísmica, es decir que un elemento con vulnerabilidad baja es capaz de resistir altos niveles de amenaza, en cambio un elemento con alta vulnerabilidad tiene poca resistencia para absorber la demanda de la amenaza, por lo que puede sufrir daños fácilmente. Finalmente, la *capacidad de respuesta*, hace referencia a la capacidad de la sociedad (instituciones y población) para reaccionar adecuadamente en los instantes de emergencia y responder al impacto, controlarlo y recuperarse; es decir que una sociedad con alta capacidad de respuesta reflejada en su buena preparación, organización, recursos para atender una emergencia, capacidad económica y de gestión para recuperarse, sufrirá un menor impacto que una sociedad con baja capacidad de respuesta, cuya falta de preparación, de organización, de recursos para la emergencia y para recuperarse, hacen que el riesgo pueda aumentar [17].

### 3.4 Construcción progresiva

Aunque no existe una definición formal de “construcción progresiva”; por medio de la observación se han podido identificar viviendas ubicadas en zonas de alta vulnerabilidad sísmica, con las características que se describen a continuación y que reflejan lo que es una construcción espontánea y progresiva no sismo resistente:

- Se construye sin el conocimiento del reglamento colombiano de construcción sismo resistente.
- Presenta voladizos que incrementan el área neta construida por piso.
- El área neta construida incrementa con su elevación.
- No hay planeación para la construcción. Incrementa el área construida según la disponibilidad del propietario.
- La mayoría son de mampostería no reforzada.
- Presentan discontinuidades en altura.

## 4. MARCO LEGAL

### 4.1 Ley 1523 de 2012

Es la ley por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres, se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 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 permanentes para el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres; con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible [18].

## **4.2 Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres**

Es el conjunto de entidades públicas, privadas y comunitarias, de políticas, normas, procesos, recursos, planes, estrategias, instrumentos, mecanismos, así como la información atinente a la temática, que se aplica de manera organizada para garantizar la gestión del riesgo en el país [19].

### **4.2.1 Instancias de dirección del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres**

Son instancias de dirección del sistema nacional:

- *El presidente de la República Conductor del sistema Nacional.* Como jefe de gobierno y suprema autoridad administrativa, está investido de las competencias constitucionales y legales para conservar la seguridad, la tranquilidad y la salubridad en todo el territorio nacional.
- *El Director de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.* Será el agente del Presidente de la República en todos los asuntos relacionados con la materia. Además de las funciones establecidas en el Decreto-ley 4147 de 2011, que se incorporan al presente artículo, las siguientes: 1) Articular los niveles nacional y territorial del sistema nacional. 2) Articular los intervinientes privados, las organizaciones sociales y las organizaciones no gubernamentales en el sistema nacional. 3) Elaborar y hacer cumplir la normatividad interna del sistema nacional, entiéndase: decretos, resoluciones, circulares, conceptos y otras normas
- *Los Alcaldes y Gobernadores.* Son conductores del sistema nacional en su nivel territorial y están investidos con las competencias necesarias para conservar la seguridad, la tranquilidad y la salubridad en el ámbito de su jurisdicción. Los gobernadores son agentes del Presidente de la República en materia de orden público y desarrollo, lo cual incluye la gestión del riesgo de desastres. En consecuencia, proyectan hacia las regiones la política del Gobierno Nacional y deben responder por la implementación de los procesos de conocimiento y reducción del riesgo y de manejo de desastres en el ámbito de su competencia territorial. Los alcaldes como jefes de la administración local representan al Sistema Nacional en el Distrito y en el municipio. El alcalde, como conductor del desarrollo local, es el responsable directo de la implementación de los procesos de gestión del riesgo en el distrito o municipio, incluyendo el conocimiento, y la reducción del riesgo y el manejo de desastres en el área de su jurisdicción [20].

### **4.2.2 Instancias de orientación y coordinación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres**

El sistema nacional cuenta con las siguientes instancias de orientación y coordinación, cuyo propósito es optimizar el desempeño de las diferentes entidades públicas, privadas y comunitarias en la ejecución de acciones de gestión:

- *Consejo Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.* Será la instancia superior encargada de orientar el sistema nacional. Este consejo se reunirá por lo menos dos veces al año en condiciones de normalidad y, tantas veces como sea necesario, durante las situaciones de desastres. El Consejo Nacional estará integrado por:
  1. El presidente de la República o su delegado, quien lo presidirá.
  2. Los Ministros o sus delegados.
  3. El Director General del Departamento Nacional de Planeación o su delegado.
  4. El Director de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, que ejerce la Secretaría del Comité

Son funciones generales del consejo nacional las siguientes:

1. Orientar y aprobar las políticas de gestión del riesgo y su articulación con los procesos de desarrollo.
  2. Aprobar el plan nacional de gestión del riesgo.
  3. Aprobar la estrategia nacional de respuesta a emergencias.
  4. Emitir concepto previo para la declaratoria de situación de desastres nacional y retorno a la normalidad.
  5. Asesorar al presidente de la república en los temas y elementos necesarios para motivar la declaratoria de estado de emergencia por grave calamidad pública.
  6. Aprobar los planes de acción específicos para la recuperación posterior a la situación de desastre.
  7. Establecer las directrices de planeación, actuación y seguimiento de la gestión del riesgo.
- *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.* Tiene las siguientes funciones:
    1. Articular los niveles nacional y territorial del sistema nacional.
    2. Articular los intervinientes privados, las organizaciones sociales y las organizaciones no gubernamentales en el sistema nacional.
    3. Elaborar y hacer cumplir la normatividad interna del sistema nacional, entiéndase: decretos, resoluciones, circulares, conceptos y otras normas.

- *Comités Nacionales para la Gestión del Riesgo.* Son instancias de asesoría, planeación y seguimiento destinadas a garantizar la efectividad y articulación de los procesos de conocimiento, reducción del riesgo y de manejo de desastres, bajo la dirección de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- *Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo.* Instancia interinstitucional del sistema nacional que asesora y planifica la implementación permanente del proceso de conocimiento del riesgo.
- *Comité Nacional para la Reducción del Riesgo.* Instancia interinstitucional del sistema nacional que asesora y planifica la implementación permanente del proceso de reducción del riesgo de desastres.
- *Comité Nacional para el Manejo de Desastres.* Instancia interinstitucional del sistema nacional que asesora y planifica la implementación permanente del proceso de Manejo de Desastres.

## 5. ASPECTOS TÉCNICOS

### 5.1 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR 10

Conforme a lo expuesto en el prefacio del NSR-10: Las normas sismo resistentes presentan requisitos mínimos que, en alguna medida, garantizan que se cumpla el fin primordial de salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte. No obstante, la defensa de la propiedad es un resultado indirecto de la aplicación de las normas, pues al defender las vidas humanas, se obtiene una protección de la propiedad, como un subproducto de la defensa de la vida. Ningún reglamento de sismo resistencia, en el contexto mundial, explícitamente exige la verificación de la protección de la propiedad, aunque desde hace algunos años existen tendencias en esa dirección en algunos países.

No sobra recordar que tan solo con dos excepciones, las víctimas humanas que se presentan durante los sismos, en su gran mayoría están asociadas con problemas en las construcciones. Las excepciones corresponden a víctimas producidas ya sea por la ola marina producida por un sismo que ocurre costa afuera, lo que se denomina Tsunami, o bien por avalanchas disparadas por el evento sísmico. El hecho de que las construcciones producen las víctimas debe tenerse en mente con el fin de justificar la imperiosa necesidad de disponer de un reglamento de construcción sismo resistente [21]. El Reglamento de Construcción sismo Resistente – NSR–10, está estructurado tal como le prescribe la ley 400 de 1997. El temario está dividido en Títulos, cada uno de los cuales agrupa una temática particular. El temario del NSR-10 se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Temario del manual de construcción sismo resistente NSR-10 [21]

Título	Contenido
A	Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente
B	Cargas
C	Concreto estructural
D	Mampostería estructural
E	Casas de uno y dos pisos
F	Estructuras metálicas
G	Estructuras de madera y estructuras de guadua
H	Estudios geotécnicos
I	Supervisión técnica
J	Requisitos de protección contra el fuego en edificaciones
K	Otros requisitos complementarios

De acuerdo a la pertinencia del tema, se puede evidenciar que el título E “casas de uno y dos pisos” es el que establece los requisitos mínimos para la construcción de viviendas con características similares a las que se han estudiado en el presente documento; por tal motivo a continuación se realiza una breve presentación del mismo. El título E del NSR-10 establece los requisitos para la construcción sismo resistente de viviendas de uno y dos pisos de mampostería confinada y de bahareque encementado. Estos requisitos son de índole general y están dirigidos a todos los profesionales de la ingeniería y la arquitectura que trabajan en construcción de vivienda, así no sean especialistas en cálculo estructural. Adicionalmente se establecen las condiciones estructurales que permitan un funcionamiento adecuado de las viviendas de uno y dos pisos ante cargas laterales y verticales en las diferentes zonas de amenaza sísmica. En el título E se dan los requisitos mínimos que se deben seguir en el diseño y construcción de viviendas de uno y dos pisos que formen parte del programa de máximo 15 viviendas y menos de 3000 m<sup>2</sup> de área construida. No obstante, si se desea, para viviendas estructuradas con muros de mampostería, puede llevarse a cabo el diseño siguiendo los requisitos de los capítulos A.1 a A.12 del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes.

## 6. GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO SÍSMICO

### 6.1 Evaluación de la vulnerabilidad en viviendas de construcción espontánea y progresiva no sismo resistente – conocimiento del riesgo

Consiste en el diligenciamiento de un formato para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas que fueron construidas de forma espontánea y progresiva no sismo resistente; el formato va acompañado de un registro fotográfico y un esquema ilustrativo donde se pueden visualizar los aspectos más críticos, tales como: irregularidades

en planta, irregularidades en altura, tipo de construcción, daños en elementos estructurales, daños en elementos no estructurales y anclajes, entre otros.

En la etapa previa al diligenciamiento del formato, se debe realizar un proceso de planeación, en el cual se identifican las zonas de mayor amenaza y mayor vulnerabilidad; conforme a dicha planeación, se procede al traslado a zonas de mayor riesgo asociado a eventos sísmicos. En campo se debe realizar una inspección visual externa con el propósito de identificar las viviendas más vulnerables; si el propietario lo permite, se procede a realizar una inspección visual interna de cada vivienda identificada para reportar los problemas más relevantes desde el punto de vista estructural y constructivo. El personal que realiza la inspección y diligenciamiento, debe estar capacitado para interpretar cada uno de los ítems que se relacionan en el formato de vulnerabilidad sísmica.

## **6.2 Estimación de posibles daños en viviendas vulnerables**

A partir del análisis y evaluación de los resultados obtenidos en la etapa anterior, se realiza una clasificación de las viviendas de acuerdo a su estructura y proceso constructivo que servirán como insumo para la implementación de modelos a escala, los cuales serán sometidos a una simulación por medio de la mesa vibratoria del CTCM configurada para reproducir diferentes tipos de sismo que se pueden presentar. En consecuencia, se pueden obtener resultados ilustrativos de los puntos más críticos y por donde la estructura podría fallar.

## **6.3 Acciones para reducir el riesgo sísmico en viviendas vulnerables**

Como resultado de la evaluación de vulnerabilidad sísmica, se identifican los puntos más débiles de la construcción y en consecuencia se identifica el riesgo existente en la vivienda. Las dimensiones y características propias encontradas en cada evaluación, sirven como insumo para la construcción de modelos que son sometidos a simulación por medio de la mesa vibratoria del CTCM SENA; así se permite visualizar el comportamiento en los puntos más débiles de la estructura. Este proceso permite identificar las alternativas para el reforzamiento y posterior reducción de la vulnerabilidad sísmica. Los elementos estructurales son mejorados para que adquieran mayor resistencia y se puedan mantener en pie en el momento del sismo. De esta manera se le da a conocer al propietario las alternativas para fortalecer su vivienda y hacerla menos vulnerable ante eventos sísmicos.

## **6.4 Preparación para la respuesta y reconstrucción de viviendas afectadas por terremotos**

Se plantean estrategias para la respuesta después de un terremoto a partir de la evaluación de ayudas y necesidades requeridas para la respuesta inmediata. Posteriormente se procede a realizar la evaluación e inspección de viviendas después de un sismo, lo que permitirá conocer la infraestructura con capacidad para resistir sin colapsar y alojar personas mientras se atiende la emergencia. Con el plan de acción específico, se da inicio a la etapa de reconstrucción de viviendas conforme a lo establecido en el reglamento de construcción sismo resistente NSR – 10.

## REFERENCIAS

- [1] Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (1999). Construcciones Menores Sismo Resistente. Manual Técnico de Capacitación. Prefacio.
- [2] Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (1999). Construcciones Menores Sismo Resistente. Manual Técnico de Capacitación. Costo social de un sismo, pp. 17.
- [3] Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (1999). Construcciones Menores Sismo Resistente. Manual Técnico de Capacitación. Presentación.
- [4] Universidad de los Andes (2004). [Modelos estructurales](#). Online [Feb 2018].
- [5] Universidad Colombia (2010). [Mesas vibratorias para pruebas sísmicas](#). Online [Feb 2018].
- [6] EAFIT (2005). [Laboratorio de investigación en ingeniería sísmica](#). Online [Mar 2018].
- [7] Giraldo, J. & Mendez, D. (2006). Evaluación de vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería en estratos uno y dos según tipificación de la estructura. Trabajo de grado. Universidad de los Andes.
- [8] Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009 (2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Presentación.
- [9] Escobar, G. (2010). Bogotá frente a la gestión integral del riesgo sísmico. Presentación. Alcaldía de Bogotá.
- [10] Salgado, M. et al. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso de las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. Revista de ingeniería 32(28), 28-37.
- [11] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2013). [Historia Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres](#). Online [Mar 2018].
- [12] García, L. (2015). Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera edición. Revista de Ingeniería 41, 71-77.
- [13] Gallart, J. (2011). Estructura interna de la tierra. Revista española de física 21, 21-25.
- [14] Toselli, A. (2010). Conceptos fundamentales. El interior de la tierra. En Toselli, A. (Ed.), Elementos básicos de petrología ígnea (pp. 15-27). Instituto superior de correlación geológica: Argentina.
- [15] Instituto Distrital de Gestión del Riesgos y Cambio Climático. (2018). [Caracterización general del escenario de riesgo sísmico en Bogotá](#). Online [Feb 2018].
- [16] Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (1999). Construcciones Menores Sismo Resistente. Manual Técnico de Capacitación.
- [17] Instituto Distrital de Gestión del Riesgos y Cambio Climático. (2018). [Caracterización general del escenario de riesgo sísmico en Bogotá](#). Online [Feb 2018].
- [18] Congreso de la República de Colombia (2012). Ley 1523. Capítulo I (1).
- [19] Congreso de la República de Colombia (2012). Ley 1523. Capítulo I (10).
- [20] Congreso de la República de Colombia (2012). Ley 1523. Capítulo II (12).
- [21] Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (2010). Prefacio.

# BIM, un paso en lo académico. Reflexión sobre la implementación de la metodología en el programa de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia

Zully A. Palomeque S.<sup>1</sup>  
Isabel C. Cerón V.<sup>2</sup>  
Scherazada Calderón V.<sup>3</sup>  
Universidad Católica de Colombia  
Bogotá – Colombia

En la actualidad muchos países están haciendo la transición de modelado en sistema CAD a modelado y gestión de proyectos bajo la metodología BIM. Son considerables los retos que supone para una sociedad integrar estas nuevas metodologías en una industria que es tan cambiante, donde participan muchas disciplinas profesionales, y cuyo aporte económico es relevante para el crecimiento de una nación. Existen diferentes autores en el contexto global que han documentado las ventajas en la implementación de la metodología, no por ello significa que sea un proceso sencillo. En este sentido, los programas de pregrado de las universidades juegan un papel fundamental. Este documento describe el ejercicio que se hizo, sobre el reconocimiento del proceso que se requeriría para conseguir la implementación de la metodología BIM en el programa actual de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia, en este, se reflexiona sobre los aspectos más relevantes a considerar en el abordaje de BIM desde la academia, particularmente desde la Ingeniería.

## 1. INTRODUCCIÓN

La metodología *Building Information Modeling (BIM)* o modelado de información para la construcción, es la herramienta de vanguardia para diseño y gestión de proyectos. La transición del modelado de proyectos de construcción *Computer Aid Design (CAD)* o diseño asistido por computador hacia metodologías que integran información, junto con modelado y animación, y que permiten diseñar y gestionar los proyectos de forma conjugada, se está recorriendo en muchos países. Las revisiones bibliográficas de algunos autores [1-5] muestran cómo han ido evolucionando en este proceso y los obstáculos que han sido superados por diseñadores, gestores, técnicos y demás participantes de la industria.

En este sentido, inicialmente el alcance de las herramientas BIM estaba orientado hacia las características visuales del diseño y la capacidad de mostrar al cliente el proyecto final mediante el uso de animaciones y buenas representaciones [6]. Pero esto en realidad es diferente de la información que las empresas de construcción necesitaban para sus procesos de obra. Ante esto, las empresas Autodesk o Graphisoft, Bentley o Nemetscheck líderes en diseño de software, han invertido en equipos de investigación por muchos años y han desarrollado gran cantidad de softwares, que permiten resolver en su gran mayoría los aspectos técnicos y administrativos para la ejecución correcta de la metodología a lo largo del ciclo de vida del proyecto [7].

Gracias a la evolución tecnológica alcanzada por la metodología BIM, se puede afirmar que lo que hace realmente que sea una herramienta tan potente es la posibilidad de hacer minería de datos, manteniendo grandes cantidades de ellos en un entorno digital constante [8], lo que permite analizar un proyecto desde diferentes disciplinas interconectadas simultáneamente al tiempo que se disminuyen las posibilidades de error.

Ante este escenario, en Colombia la industria se perfila y apunta a un futuro donde las diferentes disciplinas académicas que intervienen en la construcción aborden los proyectos bajo la perspectiva colaborativa, con el apoyo de herramientas informáticas que responden a diferentes demandas técnicas y administrativas: geotecnia, diseños, estructuras, instalaciones, materiales, eficiencia energética, gestión de costos y presupuestos, planificación de ejecución de obras, planificación de mantenimiento, planificación de gestión ambiental, recursos humanos, operación y mantenimiento, calidad u otras propias de la correcta ejecución de la plataforma BIM.

El objetivo de este capítulo es contextualizar los procesos, requerimientos y esfuerzos que supone la implementación de la metodología BIM en los programas de formación universitaria de pregrado. Por consiguiente, se presentará un acercamiento a la implementación de BIM en el Programa de Ingeniería Civil (en adelante PIC) de la Universidad Católica de Colombia (en adelante UCC).

## 2. MARCO GLOBAL

BIM comenzó a tener auge en el año 1975 donde el Profesor del Instituto Tecnológico de Georgia, Chuc Eastman publica un primer trabajo sobre la metodología. En 1984 se crea la norma ISO 10303 que es la norma para la automatización de sistemas industriales e integración; norma también conocida como ISO STEP. A partir de allí, se

---

<sup>1</sup> zapalomeque@ucatolica.edu.co

<sup>2</sup> icceron@ucatolica.edu.co

<sup>3</sup> scalderon@ucatolica.edu.co

continúa durante varios años con el desarrollo del software, normas y estándares para la integración de diseños bajo la metodología BIM. En el año 2002, en Finlandia se crea el primer proyecto bajo la metodología, en 2006 en Estados Unidos se desarrolla el primer proyecto de su país; con la realización de los dos anteriores, se comienza a crear las guías en las que se orienta los pasos necesarios para la ejecución de un proyecto bajo la metodología BIM; guías que fueron publicadas en Finlandia en el año 2012 [9, 10].

Para entender el estado actual de la implementación de la metodología BIM en Colombia, es necesario comprender lo que sucede convencionalmente en los proyectos. Es decir, una mirada amplia a la gestión de los proyectos por parte de las empresas permite identificar hacia donde debe estar orientada la formación de los profesionales, durante la etapa de pregrado en la universidad. ¿Cuál es el papel que juega la universidad como entidad formadora en todos estos procesos de integración de nuevas metodologías, técnicas y/o conceptualizaciones? A continuación, se resume lo que en términos generales suele suceder en este sentido.

## **2.1 La gestión convencional de los proyectos de construcción en Colombia**

Durante muchos años, se ha visto y convivido con muchas dificultades que se presentan durante el acoplamiento de las diferentes áreas (técnicas y administrativas) que intervienen en un proyecto constructivo; ya sea, en la prestación de un servicio y/o construcción de un producto. A pesar de que todas las disciplinas trabajan bajo el mismo objetivo, desde siempre ha significado para todos, una ardua labor conseguir armonizar el trabajo, esto con la finalidad de reducir la posibilidad de error y por consiguiente los imprevistos.

Son muchos los factores que han sido recogidos en la literatura [11], pero destaca entre ellos la diferente naturaleza en la formación profesional; es decir, la manera como se entiende la labor y sus productos. El profesional de nuestros tiempos entiende que su labor se reduce a proyectar y/o a construir una pequeña parte de un todo, en muchos casos sin considerar la articulación de su resultado con el de las otras disciplinas presentes. Para él, cuando este objetivo está cumplido, normalmente se desentiende de los resultados del proyecto; cosa que parece adecuada cuando se trabaja mediante subcontratos de las áreas de especialidad, pero desde una mirada más amplia del proyecto, aumenta la posibilidad de error y el poco compromiso de las partes frente al resultado final del proyecto.

Tradicionalmente los proyectos -edificaciones y/u obras de infraestructuras, con fondos públicos o privados- en Colombia se han abordado en dos grandes fases: la primera fase de estudios, diseño y presupuesto; la segunda fase de ejecución y/o materialización, de tal manera que no se contemplaba el proyecto a lo largo de todo el ciclo de vida. Cuando el proyecto se encuentra en estas etapas, la dinámica natural de trabajo se basa en el seguimiento lineal de una planificación por actividades, que en algunos casos no se puede soslayar y la intervención se hace en orden cronológico, con unos tiempos que suelen ser muy ajustados. Al finalizar la etapa de construcción, lo que sucede normalmente, es que comienza para el proyecto una nueva etapa de operación y mantenimiento que es gestionada por un ente distinto al constructor. Es en esta fase donde normalmente salen a flote errores que hubieran podido ser evitados en una temprana etapa de diseño.

Dado que el especialista que diseña no tiene la posibilidad de acceder a las particularidades (técnicas y/o administrativas) que limitan sus resultados, existe una alta probabilidad de que surjan errores durante la ejecución de las tareas. Cuando es el caso, implica casi siempre tomar decisiones informales y retroceder en el cronograma al punto de partida de la actividad que se ve afectada, lo que se traduce en descontrol en cuanto a los retrasos y sobrecostos. Pero en la actualidad, con el ingreso de nuevas modalidades de contratación con el Estado como son; contratos a través de Asociaciones Publico Privadas - APP [12], y/o Concesiones [13], y además en casos donde existen certificaciones vinculadas a los proyectos, como es el sistema de certificación en sostenible LEED que incluye una especialidad de certificación para edificios durante la etapa de Operación y el Mantenimiento; *Building Operations and Maintenance* - LEED O+D [14], puede suceder que sea necesario que quien proyecta o construye aborde esta tercera fase de operación y mantenimiento del proyecto como parte de su estrategia de negocio. En este orden de ideas, tener presente el proyecto a lo largo de todo el ciclo de vida desde una primera fase de diseño parece muy acertado.

## **2.2 BIM en las empresas colombianas**

Es natural que la incursión de una nueva metodología/tecnología en una industria requiera la inversión de tiempo y esfuerzos para alcanzar resultados exitosos, medibles y cuantificables. En Colombia, actualmente es muy común el uso del término BIM, pero la realidad enseña una industria que aún se resiste a la incursión en el tema; esto es, el país experimenta una etapa temprana de transición entre el modelado CAD a la metodología BIM.

En la literatura, sobre casos recientes de aplicación de la metodología BIM [15], se puede leer por ejemplo que hay muy poca preparación académica para abordar todos los retos que supone el cambio. Es decir, estamos en el punto en el que, por falta de formación profesional, la metodología se aborda de una manera parcial, ya que para muchas compañías se necesita un gestor externo que articule los procesos BIM. Por lo tanto, más que una herramienta de trabajo que aporta beneficios, supone una labor adicional a resolver por todos los involucrados. Al final, todo se traduce en retrasos en las entregas por parte de los sub-contratistas, con una dificultad adicional; la demora en la articulación de las entregas por parte del gestor BIM.



No obstante, la promesa de éxito de la metodología es tan grande que se puede leer en los medios de comunicación, el llamado al sector público y a la academia, para que se aúnen esfuerzos en pro de una actualización en las metodologías aplicadas a los proyectos constructivos, para que esté en consonancia con lo que está ocurriendo en el mundo entero [16]. En este sentido, cabe resaltar la labor realizada por Camacol [17], entidad reconocida en la industria de la construcción en Colombia, que se ha tomado el tiempo necesario para indagar y profundizar sobre las ventajas que supone para el país actualizar los modelos de planificación, ejecución y gestión, bien del sector público como el privado. Otros esfuerzos deben ser orientados hacia el desarrollo de regulaciones BIM, que puedan ser aplicadas al territorio nacional a través de las cuales los profesionales superen las dificultades a las que se enfrentan, sobre los alcances y criterios a seguir en los planos y las entregas. Está claro que la unificación de criterios en este sentido favorece el control de calidad y la gestión exitosa, obteniendo el mayor provecho de la metodología [18].

### **3. BIM EN LA UNIVERSIDAD**

Actualmente en Colombia, salvo unos casos aislados de programas de posgrado (maestrías, especializaciones y diplomados), no se reconocen programas de pregrado universitarios que hayan asumido como reto la implementación de BIM en toda su estructura curricular. Sin embargo, casi todas las universidades que imparten programas de arquitectura e ingeniería, al día de hoy cuentan con las herramientas informáticas para hacerlo, incluso a través del funcionamiento de licencias de Softwares gratuitos, como es el caso de Autodesk [19]. La incursión en muchos de los programas de pregrado se está haciendo de una manera silenciosa, promoviendo el uso de los softwares principalmente en las facultades de arquitectura con fines de modelación.

Un estudio hecho por la facultad de arquitectura de la Universidad Nacional [20], reconoce que BIM no sólo debe entenderse como una herramienta informática para diseño y ejecución de proyectos de construcción, sino que hay que interiorizar una nueva esencia metodológica para conceptualizar los proyectos de construcción. En este sentido, el autor reconoce un aspecto que es fundamental a la hora de implementar la metodología BIM, y es el hecho de que, actualmente en las asignaturas de pregrado, el proyecto constructivo es abordado a modo de “entregas parciales”; es decir, el diseño de un proyecto no está pensado para responder a lo largo de todo el ciclo de vida. Es por esto, que BIM supone un cambio en la forma como se enseñan desde la Universidad los métodos para pensar y hacer arquitectura y/o ingeniería, ya que al abordar la herramienta el estudiante se ve obligado a diseñar pensando en el uso, las características particulares y generales, las fases del proyecto, los procesos de ejecución, la gestión y posteriormente, la fase de operación y mantenimiento.

Por otro lado, la dinámica en la enseñanza universitaria debe estar orientada hacia el trabajo cooperativo, la comprensión de las potestades de las diferentes disciplinas que intervienen, el respeto por el conocimiento del otro, aprender a trabajar en consonancia con otras disciplinas bajo los mismos parámetros y, el entrenamiento en el uso de nuevas herramientas, entendiéndose de que la aplicación es diferente y que requiere la introducción de información específica de todos los detalles del modelo y de su entorno.

### **4. IMPLEMENTACIÓN DE BIM EN EL PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UCC**

Considerando todo lo anterior, y atendiendo las inquietudes que surgen en la comunidad académica y en la industria, desde la UCC se ha hecho el ejercicio de reflexionar sobre los aspectos que se deben abordar para llevar a cabo la implementación de la metodología BIM en el PIC. En ese orden de ideas, a primera vista se reconocen los siguientes:

- La aplicación de la metodología BIM vista desde los elementos aplicables a cada asignatura y herramientas informáticas de diseño.
- Los requerimientos para la formación a los profesores.
- Reformas en los contenidos curriculares.
- Disposición de recursos físicos y tecnológicos por parte de la UCC.
- Planificación logística para llevar a cabo la formación.

En los sucesivos párrafos de este capítulo, se abordarán dichos aspectos conscientes de que la discusión no está zanjada. La implementación de la metodología BIM es un reto que a mediano plazo se deberá asumir en todas las aulas de las instituciones de educación superior que ofrecen los programas relacionados con la construcción.

#### **4.1 Softwares disponibles**

Las diferentes especialidades técnicas que aborda la Ingeniería Civil, por lo general requieren de softwares mediante los cuales se puedan alcanzar los objetivos de análisis y de diseño. La UCC, por ejemplo, cuenta con softwares de uso académico en el PIC. Cada uno de ellos, asociado a la asignatura que le corresponda; es decir, hay softwares específicos para hidráulica e hidrología, otros son utilizados en estructuras, otros para diseño de vías y carreteras y así sucesivamente. BIM en contraste, permite trabajar en diferentes disciplinas paralelamente, sin embargo, actualmente, no todas las particularidades de la profesión pueden ser abordadas desde los Softwares -y sus extensiones- desarrollados para la metodología. A manera descriptiva, en la Tabla 11 se muestran los softwares reconocidos en Colombia para el desarrollo de la metodología BIM, en los proyectos de obra civil. Esta tabla se realiza considerando la información publicada por los fabricantes en sus páginas web.

## 4.2 Áreas de formación

De acuerdo a los criterios establecidos por el Ministerio de Educación Nacional, Decreto 1295 de 2010 [24], y Decreto 1075 de 2015 [25], en cuanto a la calidad de los programas de formación ofertados por Instituciones de Educación Superior, han supuesto un cambio en los métodos de la estructuración curricular, académica, investigativa y administrativa. En la actualidad, los cambios han suscitado que el PIC de la UCC, se articule a través de áreas del conocimiento: Construcción y Administración de Obras, Estructuras, Geotecnia y Pavimentos, Recursos Hídricos y del Ambiente, Vías y Transporte. Estas áreas, a su vez comprenden las diferentes asignaturas del componente disciplinar del programa, que se estudian a lo largo de diez (10) semestres académicos.

Dado que las asignaturas del PIC se apoyan en softwares de diseño y modelación, en este punto, ¿“los softwares BIM” (ver Tabla 11) deben ser analizados como herramientas complementarias?, o a través de estos, ¿se conseguirían los mismos objetivos alcanzados con herramientas convencionales? Para intentar abordar estas preguntas, se muestra a continuación en la Tabla 12, la relación existente entre los softwares actualmente utilizados en el PIC de la UCC; y así, describir los alcances proporcionados por cada uno y su equivalencia a la metodología BIM. La información recogida allí, ha sido obtenida de los laboratorios de informática de la UCC y/o de las páginas web de cada fabricante. Este ejercicio puede proporcionar un bosquejo sobre la “ruta inicial”, para visualizar los esfuerzos necesarios por parte de la UCC, en términos de softwares.

**Tabla 11.** Descripción del software más común en el mercado colombiano

Software	Aplicabilidad	Fuente
<p><b>ARCHICAD:</b> creado por Graphisoft de Hungría. Permite modelar a los usuarios sus diseños de forma paramétrica, mediante la información contenida en una biblioteca de datos que contienen la información del proyecto a construir.</p> <p><b>Sistema operativo:</b> Microsoft Windows, Mac OS X (PowerPC), Mac OS X (Intel).</p>	<p>Es un software para construir edificaciones, inicialmente en formato 2D (desde planta), basándose en parámetros básicos, tales como altura, largo, espesor y elevación en el caso de muros; y altura, ancho, largo y elevación en el caso de objetos. Además, utiliza un lenguaje común para arquitectos; es decir, en vez de términos como: puertas, ventanas, escaleras, forjados y techos, hace referencia a: alfeizar, telar, paso, contrapaso.</p>	[21]
<p><b>REVIT:</b> Software para modelar los diseños de proyectos constructivos. Permite una interacción bidireccional para todas las áreas que integran el proyecto a diseñar; esto quiere decir, que si se genera un cambio en una parte del diseño las áreas involucradas en esa área verán el cambio y la incidencia que se efectuara para las áreas relacionadas.</p> <p><b>Sistema operativo:</b> Microsoft Windows.</p>	<p>REVIT, tiene una aplicabilidad muy variada ya que es un software CAD BIM, donde colaboran diferentes disciplinas dentro del diseño arquitectónico y constructivo. Las principales disciplinas que hacen uso de Revit son arquitectura, estructura, mecánica, fontanería, electricidad y coordinación; las cuales, se pueden desglosar en sub-disciplinas acorde a las necesidades del usuario. Las empresas que adoptan el software, pueden examinar el proceso del flujo de trabajo existente para determinar de qué manera emplear esta herramienta de colaboración. Además, tiene una ventaja en la aplicación en fases intermedias de los proyectos, que no han sido concebidos desde su inicio en Revit.</p>	[22]
<p><b>TEKLA STRUCTURE:</b> Software para la modelación de diseños de diferentes áreas y elementos usados en 3D. Es capaz de desarrollar el modelado de estructuras complejas y genera despieces de los planos en diferentes vistas, al igual que REVIT se integra los cambios en todas las áreas involucradas en un proyecto.</p> <p><b>Sistema Operativo:</b> Microsoft Windows.</p>	<p>La aplicabilidad de TEKLA STRUCTRES es muy variada puesto que ofrece la posibilidad de integrarse con algunos programas de cálculo fundiendo así los pasos de diseño de estructuras y detallado también permite el modelado de los materiales que se usaran en el proyecto de construcción.</p>	[23]

Sumados a lo anterior, se sabe que uno de los grandes beneficios de BIM es precisamente, la gerencia eficiente de los proyectos a través de la herramienta. En este orden de ideas, las asignaturas de administración deberían incluir un apartado en el cual se abordarán los temas relevantes a la gestión a través de la metodología BIM, en este sentido las herramientas cuentan con ventajas que se describen a continuación:

- ARCHICAD, integra una hoja de cálculo que facilita la realización de APUS exportable a Excel. También genera listados de cantidades de obra precisos compatibles con MC Project. Adicionalmente, la herramienta cuenta con un simulador de construcciones que permite visualizar la animación de los procesos constructivos.
- REVIT, realiza los mismos enlaces de Archicad pero haciendo uso de plug-ins, lo que supone un incremento en costos de las licencias.
- TECKLA STRUCTURES, cuenta con una hoja de cálculo que permite introducir costos y tiempos, los cuales alimentan los cronogramas y los presupuestos. Adicionalmente, el software tiene una extensión con Primavera.

## 4.3 Capacitación a profesores

Se debe considerar iniciar la capacitación de los profesionales que actualmente conforman el cuerpo profesor del PIC de la UCC, en las áreas de formación disciplinar que al momento tengan la aplicabilidad a la metodología BIM (ver Tabla 12). Aparentemente la tarea es sencilla; sin embargo, al aterrizar la actividad a la realidad de la UCC, se evidencian dificultades que implican cambios o replanteamientos de orden administrativa, curricular y/o cultural. En este sentido, se reconoce que el personal profesor tiene una brecha de hasta cinco (5) generaciones, lo que implica una resistencia natural a las nuevas tecnologías de enseñanza y formación. No obstante, la UCC debería aunar los esfuerzos necesarios para que todo su personal profesor alcance las competencias requeridas: seminarios de

nivelación en cuanto a manejo de herramientas informáticas, foros de sensibilización, talleres participativos de divulgación, capacitación por área de formación, incentivos por logros alcanzados, acompañamientos y tutorías a los profesores, entre otras. Estas actividades deberían estar incluidas dentro de las jornadas laborales establecidas con los profesores; lo que supone, un esfuerzo en cuanto a unificación de horarios disponibles para recibir el aprendizaje. Además, la UCC debería contemplar el riesgo de capacitar personal que no sea de tiempo completo.

**Tabla 12.** Softwares utilizados en el PIC de la UCC y su relación con los Softwares aplicables desde la metodología BIM - 2018

Softwares UCC	Descripción	Compatibilidad a BIM
Arcgis Versión 10.5.1	Software utilizado en el campo de los Sistemas de Información Geográfica que permite la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.	Archicad y Revit
AutoDesk 2015, 2017 y 2018	Suite con software de diseño en 2D y 3D para las industrias de manufacturas, infraestructuras, construcción, medios y entretenimiento.	Archicad, Revit y Tekla
DRIP	Software para realizar cálculos de diseño hidráulico, para el análisis de drenaje subterráneo de pavimentos.	No aplica
Epanet 2.0	Software para el análisis hidráulico de redes de tuberías a partir de las características físicas de las tuberías, obtener la presión, los caudales en nodos y tuberías respectivamente. Adicionalmente, Epanet permite el análisis de calidad de agua a través del cual es posible determinar el tiempo de viaje del fluido desde las fuentes (tanques o embalses), hasta los nodos del sistema.	No aplica
ETABS x64 Versión 2016	Software que integra todos los aspectos de un proyecto de edificios, desde el inicio de su concepción, a la conexión BIM y detalle de estructuras. Importa el modelo desde Autocad y exporta los resultados a diferentes programas tales como SAP2000, SAFE, Microsoft Access, Microsoft Excel, Microsoft Word, Autocad, y otros.	Revit y Tekla
Geostudio Versión 8.15.3.11339	Software de modelación geotécnica y geo-ambiental. Análisis de estabilidad en suelos en declive para calcular el factor de seguridad de las pistas de tierra y roca.	No aplica
HEC-HMS Versión 4.2.1	Software para realizar simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido y para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias.	No aplica
HEC-RAS Versión 5.0.3	Software para realizar cálculos de caudal constante, unidimensional y bidimensional, cálculos de transporte de sedimentos / cama móvil y modelos de calidad de agua.	Mismo fabricante de Revit, pero aún no tiene extensión a BIM.
HY-8	Software para el cálculo y diseño de obras de drenaje transversal. Automatiza los cálculos hidráulicos de las alcantarillas.	No aplica
Project Profesional 2016	Software para administración de proyectos. Organización de actividades, asignación de recursos, administración del presupuesto, seguimiento al progreso del proyecto y análisis de cargas de trabajo.	Archicad, Revit y Tekla
SAP 2000 Versión 19	Software de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento de problemas de ingeniería de estructuras.	Revit y Tekla
SWMM Versión 51012	Software para simulación de precipitaciones, bien sea para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. Permite simular tanto la cantidad, como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos.	No aplica
WaterCAD Versión 10.00.00.50	Software para el análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución o de riesgo). Permite la simulación hidráulica de un modelo computacional representado en este caso por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nodos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc.)	No aplica

#### 4.4 Reforma curricular

Por otro lado, cuando se plantea implementar una herramienta nueva en un programa académico, implica la modificación de los planes de asignaturas de la malla curricular que se traduce, en una reforma curricular. Si se consideran los requerimientos del Ministerio de Educación Nacional [24], [25], y las implicaciones que se producen en la comunidad académica, lo conveniente sería que tal reforma coincida con la renovación de Registro Calificado del programa, que sucede por lo menos cada siete (7) años. Desde este punto de vista, parece más adecuado que la implementación de la metodología BIM a los estudiantes, inicialmente se haga de manera paulatina, a través de asignaturas electivas del programa.

#### 4.5 Recursos físicos y tecnológicos

Aunque la UCC cuenta con los espacios adecuados para el estudio de asignaturas que requieren herramientas informáticas, supone un esfuerzo, en cuanto a la articulación detallada entre los planes de clase de las asignaturas y la plataforma gestora del recurso físico de la UCC. Sumado a esto, se debe garantizar la existencia de las licencias requeridas; bien para la capacitación de los profesores, como para la posterior formación a los estudiantes.

#### 4.6 Capacitadores BIM

Teniendo en cuenta que, en Colombia no se reconocen programas de pregrado que hayan implementado la metodología BIM, por lo que no se puede mencionar ni los costos, ni los tiempos asociados a este tipo de formación.

Por tal motivo, parece razonable que la UCC realice un estudio de mercado previo, para así establecer de manera más certera, un cronograma y un presupuesto de capacitación.

## **5. ARTICULACIÓN DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL CON EL PROGRAMA DE ARQUITECTURA**

Normalmente, en los proyectos de construcción se identifican al menos una de las siguientes disciplinas: administradores (y/o similares), arquitectos y/o ingenieros. Desde una mirada lejana, para los administradores la gestión de procesos es indiferente del objeto último del proyecto, lo que favorece el trabajo multidisciplinar. Caso contrario sucede entre la ingeniería y la arquitectura, ya que las bases del conocimiento se estructuran bajo diferentes formas de razonamiento. En este sentido, el objetivo de la Universidad debería ser, que desde el pregrado se genere el espacio en donde, los estudiantes tengan la oportunidad de adquirir la destreza de trabajar de manera colaborativa con otras disciplinas. Bajo este contexto, una alternativa podría ser, que a través de un proyecto integrador los estudiantes pudieran interactuar con un objetivo común, enmarcado dentro del contexto de la construcción. Cabe resaltar que, la UCC tiene la ventaja de que cuenta con la facultad de ingeniería y la de arquitectura.

## **6. CONCLUSIONES**

Desde la industria de la construcción se reconoce la necesidad de implementar BIM en los programas de pregrado, con el propósito de fortalecer las competencias de los profesionales y las habilidades para trabajar colaborativamente entre ellos y/o con otras disciplinas. Conscientes de esta necesidad, en este capítulo, se ha hecho una reflexión considerando todos los esfuerzos que se requieren a la hora de modificar una metodología de enseñanza de pregrado, que ha sido el modelo seguido por muchos años en el mundo entero.

Teniendo en cuenta las características del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia, se identifica que las áreas de formación que se pueden abordar actualmente desde la metodología BIM serían las de construcción y administración de obras, estructuras, vías y transporte, cuyas asignaturas están directamente relacionadas con los softwares; Arcgis Versión 10.5.1, AutoDesk 2015, 2017 y 2018, ETABS x64 Versión 2016, Project Profesional 2016 y SAP 2000 - Versión 19, pues cuentan con extensión actual a las aplicaciones de los “softwares BIM”.

En las otras áreas técnicas de la Ingeniería Civil, como geotecnia y pavimentos, recursos hídricos y del ambiente, se evidencia que hay un camino por recorrer, que no depende de la Universidad, en cuanto al desarrollo de softwares y/o plug-ins que faciliten la aplicabilidad,

Es importante mencionar, que este proceso de adaptación no es viable a corto plazo, pues requiere otras consideraciones que hacen referencia a la capacitación de los profesores, a los recursos físicos y tecnológicos, a la reforma curricular y a la toma de decisiones frente a la consecución de un ente capacitador, y toda la logística que esto conlleva.

También, es necesario generar los espacios para que la comunidad académica adquiera la cultura y la destreza necesaria para afianzar el trabajo colaborativo, así como fomentar las buenas prácticas para realizar el trabajo en equipo y promover el respeto en general. En este sentido, hay que considerar la gran oportunidad que tiene la Universidad Católica de Colombia, ya que cuenta con los dos programas; el de Ingeniería Civil y el de Arquitectura.

## REFERENCIAS

- [1] Olawumi, T. & Chan, D. (2018). Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Sustainable Cities and Society* 1, 16-27.
- [2] Volkov, A., Chelyshkov, P. & Lysenko, D. (2016). Information Management in the Application of BIM in Construction. Stages of Construction. *Procedia Engineering* 153, 833-837.
- [3] Díaz, J. (2015). BIM en Alemania. Estado actual y la experiencia de implementación. In Congreso internacional BIM – EUBIM. Valencia, España.
- [4] Ghaffarianhoseini, A. et al. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 1046-1053.
- [5] Smith, P. (2014). BIM Implementation – Global Strategies. *Procedia Engineering* 85, 482-492.
- [6] Huhnt, W. et al. (2010). Data management for animation of construction processes. *Advanced Engineering Informatics* 24(4), 404-416.
- [7] Architect Magazine (2014). [Autodesk, Graphisoft, and Bentley Systems Release New Digital Tools to Refresh Your Workflow](#). Online [May 2018].
- [8] Bargstädt, H. (2015). Challenges of BIM for Construction Site Operations. *Procedia Engineering* 117, 52-59.
- [9] López, L. (2017). [Planteamiento de una estrategia de inclusión de BIM para empresas medianas de arquitectura en la etapa de diseño](#). Online [May 2018].
- [10] Eastman, C. et al. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- [11] Buscador de Arquitectura. (2017). [13 Razones por las que las empresas de construcción pierden dinero](#). Online [May 2018].
- [12] Departamento Nacional de Planeación de Colombia (2016). [Guía de Asociaciones Público Privadas – Capítulo 1. La Asociación Público Privada](#). Online [May 2018].
- [13] Construdata (2013). [Las concesiones: en qué consisten y características](#). Online [May 2018].
- [14] U.S. Green Building Council (2017). [Getting started with LEED Building Operations and Maintenance](#). Online [May 2018].
- [15] Meneses, E. & Montoya, B. (2014). La utopía de la implementación del B.I.M en la industria de la construcción en Colombia. In XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics.
- [16] La República. (2017). [Bim Bang](#). Online [May 2018].
- [17] Concejo Profesional Nacional de Arquitectura y sus Profesiones Auxiliares (2018). [Fomento y maduración del uso de BIM en Colombia](#). Online [May 2018].
- [18] Consejo Profesional Nacional de Arquitectura y sus Profesionales Auxiliares [Documentaciones sobre práctica profesional](#). Online [May 2018].
- [19] Autodesk (2018). [Education Community](#). Online [May 2018]
- [20] Ocampo, J. (2014). La gerencia BIM como sistema de gestión para proyectos de construcción. *Revista Gerencia Tecnológica Informática* 14(38), 17-29.
- [21] Graphisoft. [Contact GRAPHISOFT Worldwide](#). Online [Apr 2018].
- [22] AUTODESK. [www.autodesk.es/products/revit/overview](#). Online [Apr 2018].
- [23] TEKLA. [www.tekla.com/la/productos/tekla-structures](#). Online [Apr 2018].
- [24] Ministerio de Educación Nacional (2010). [Decreto No. 1295. Por el cual se reglamenta el registro calificado de que trata la Ley 1188 de 2008 y la oferta y desarrollo de programas académicos de educación superior](#). Online [May 2018].
- [25] Ministerio de Educación Nacional (2015). [Decreto No. 1075. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Educación](#). Online [May 2018].

# Sistema de reconocimiento de maduración del tomate, mediante el procesamiento de imágenes con OpenCV y Python en una Raspberry Pi 3 B

Ángel A. Rodríguez A.<sup>1</sup>

John A. Figueredo L.<sup>2</sup>

Juan A. Chica G.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Universidad Nacional Abierta y a Distancia  
Acacias – Colombia

<sup>3</sup> Corporación Universitaria Autónoma de Nariño  
Villavicencio – Colombia

En la actualidad, el procesamiento de imágenes aplicado a diferentes campos de la ingeniería ha tenido un crecimiento elevado, desde el reconocimiento de un simple color para clasificar un objeto, hasta la detección de rostros con el fin de hacer un reconocimiento facial de personas. Hoy en día, gracias a la evolución y el abaratamiento del hardware y el uso de software libre, se puede desarrollar herramientas de bajo costo para aplicaciones de mediana complejidad en el área de procesamientos de imágenes, es así, como en este capítulo se muestra el principio del desarrollo de un sistema de procesamiento de imágenes de bajo costo, basado en una tarjeta Raspberry pi 3 modelo B y el uso de la librería OpenCV en Python para el reconocimiento del estado de maduración del tomate, en aras de realizar una clasificación por tamaño y color del fruto, con el fin de ser aplicado a futuro en la generación de valor agregado para los productores y comerciantes de tomate en el departamento del Meta. Como resultado se obtiene el prototipo piloto capaz de reconocer la maduración de diferentes tomates, aplicando el procesamiento de imágenes con la librería OpenCV mediante la técnica de segmentación de imágenes realizando correcciones en la imagen a procesar, minimizar el ruido y las perturbaciones.

## 1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de imágenes es el principio de la visión por computador, en el cual por medio de una imagen digital (foto, imagen o fotograma) se puede analizar diferentes características en ella, tales como color, forma, textura, tamaño, entre otras, para cumplir una finalidad dentro de un algoritmo ejecutado en un computador o hardware con similares funcionalidades [1], es así como en los últimos años se ha desarrollado software y librerías específicas para esta función, y así poder realizar algún tipo de proceso encaminado hacia la visión por computador en la industria, robótica y automatización de procesos [18]. En el área de la ingeniería, se pueden encontrar diferentes softwares que pueden llevar a cabo esta funcionalidad, como lo es el caso de MATLAB o LABVIEW, estos softwares son aplicados a diferentes campos de la ingeniería, pero no son desarrollados específicamente al procesamiento de imágenes, aunque parte de ellos dedican diferentes Toolbox y herramientas dedicadas a esta área [8]; con el fin de realizar el procesamiento digital de imágenes, cabe señalar que los dos softwares mencionados anteriormente son licenciados y el costo de uso y/o adquisición es bastante elevado para aplicaciones de baja escala o dirigidos a pequeños proyectos, donde el presupuesto juega un papel importante a la hora de llevarlos a cabo.

Por otra parte, también existen otras alternativas de software para realizar el procesamiento digital de imágenes digitales y al alcance de cualquier investigador. Este es el caso de la librería OpenCV de Intel, bajo licencia BSD, siendo gratuita para uso académico y comercial [11], la cual puede ser utilizada con diferentes lenguajes de programación, tales como C++, Python y Java, además, puede ser instalada en diferentes sistemas operativos como por ejemplo Windows, MAC OS, iOS, Android, Linux y Raspbian; este último sistema operativo soportado para las tarjetas Raspberry Pi [21].

## 2. HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

En el mercado existe una gran variedad tanto de hardware y software que puede ser utilizado para el procesamiento digital de imágenes, los cuales pueden variar en la capacidad de procesamiento, robustez, velocidad y costo, esta última ítem es uno de los más importantes criterios a la hora de su implementación; ya que presenta los mayores limitantes a la hora de seleccionar el conjunto de herramientas (Hardware y software) para llevar a cabo el proyecto. Esta investigación se basa principalmente, en el desarrollo de una herramienta de bajo costo de implementación para el procesamiento digital de imágenes en la determinación de estado de maduración del tomate (maduro o verde) y tamaño, con el fin de clasificar automáticamente estos dos criterios bajo ambientes controlados dentro de una cadena de producción. De acuerdo a lo anterior se determinó las herramientas de hardware y software a implementar [23].

### 2.1 Hardware

El hardware para el procesamiento digital de imágenes, se basó en la relación costo-beneficio para la finalidad de la investigación, el cual será el encargado de proveer un procesamiento eficaz a un bajo costo, además, realizar la función

---

<sup>1</sup> [angel.rodriguez@unad.edu.co](mailto:angel.rodriguez@unad.edu.co)

<sup>2</sup> [john.figueredo@unad.edu.co](mailto:john.figueredo@unad.edu.co)

<sup>3</sup> [juan.chica@auarvillavicencio.edu.co](mailto:juan.chica@auarvillavicencio.edu.co)

de procesar la información en tiempo real y sea capaz de enviar las señales a los actuadores con el fin de clasificar los tomates de acuerdo a los criterios antes mencionados [17]. El hardware que mejor se amolda a los requerimientos del sistema es la tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B. La cual la define según la Raspberry PI Foundation como un computador de bajo costo y de alto rendimiento, desarrollada con el criterio de que cualquier persona pueda acceder a este hardware y pueda aprender, resolver problemas y divertirse [15]. La Raspberry Pi Modelo B (Figura 1), cuenta con un sistema operativo de distribución libre basado en Debian llamado Raspbian, por otra parte, esta tarjeta tiene un costo aproximado de \$40 Dólares y cuenta con las siguientes características:

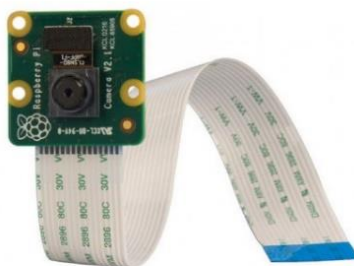
- Chipset Broadcom BCM2837 a 1,2 GHz
- ARM Cortex-A53 de 64 bits y cuatro núcleos
- LAN inalámbrica 802.11 b/g/n
- Bluetooth 4.1 (Classic y Low Energy)
- Coprocesador multimedia de doble núcleo Videocore IV
- Memoria LPDDR2 de 1 GB
- Compatible con todas las últimas distribuciones de ARM GNU/Linux y Windows 10 IoT
- Conector micro USB para fuente de alimentación de 2,5 A
- 1 puerto Ethernet 10/100
- 1 conector de vídeo/audio HDMI
- 1 conector de vídeo/audio RCA
- 1 conector de cámara CSI
- 4 x puertos USB 2.0
- 40 pines GPIO
- Antena de chip
- Conector de pantalla DSI
- Ranura de tarjeta microSD
- Dimensiones: 85 x 56 x 17 mm

Estas características la postulan como una herramienta idónea con gran potencial para desarrollar el procesamiento digital de imágenes en la selección de los tomates por tamaño y tipo de maduración.



**Figura 1.** Tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B (<https://www.raspberrypi.org/>)

Para la captura de las imágenes, ya sea en video o fotos, se implementó la cámara Rasicam (Figura 2), desarrollado para conectarse directamente en uno de los puertos dedicados CSI para obtener las imágenes a procesar en la Raspberry. Esta cámara cuenta con 5 megapíxeles con un lente de foco fijo y es capaz de tomar imágenes de 2592 x 1944, siendo compatible con el formato de video 1080p30, 720p60 y 640x480p60/90, todas estas características mencionadas anteriormente por un costo aproximado de \$8 Dólares.



**Figura 2.** Cámara Raspicam (<https://www.raspberrypi.org/>)

## 2.2 Software

El sistema operativo que se implementará en la tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B, será el nativo de la propia tarjeta, el cual es Raspbian, este sistema operativo se basa en Debian y es el sistema operativo oficial para la tarjeta, por otro

lado, cabe resaltar que existen varios sistemas operativos para la tarjeta Raspberry, tales como Windows IoT, Ubuntu Mate, entre otros, lamentablemente la mayoría de ellos ralentiza el funcionamiento de la tarjeta [8]. Por otra parte, el lenguaje que se trabajará para el desarrollo del algoritmo que cumpla la función del procesamiento de imágenes será Python, el cual ya viene instalado dentro del sistema operativo Raspbian. Python es un lenguaje de programación interpretado, el cual su filosofía se basa en una sintaxis que favorezca el código legible [2], además, otra de las características de este lenguaje de programación es que es multiparadigma, ya que soporta programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional, siendo este multiplataforma lo que lo hace ideal en una gran variedad de aplicaciones.

La librería principal adicional para el procesamiento de imágenes es OpenCV, la cual es desarrollada por Intel para el procesamiento digital de imágenes, esta librería puede aprovechar el procesamiento de varios núcleos, además, puede aprovechar la aceleración de hardware de la plataforma informática heterogénea subyacente [11]. Esta librería se complementa con la librería NumPy para Python, la cual agrega soporte para vectores y matrices, haciéndola ideal para el procesamiento de imágenes con el fin de optimizar las operaciones matriciales necesarias cuando es necesario segmentar la información obtenida en una imagen.

### 3. TÉCNICAS Y MÉTODOS APLICADOS EN OPENCV PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Existen diferentes técnicas para extraer información de una imagen digital, las cuales pueden ser, desde la umbralización del color de un pixel para el reconocimiento de un color o gamas de colores de un objeto, hasta técnicas más avanzadas como la correlación digital de imágenes enfocada a encontrar patrones de objetos para su reconocimiento. Para este caso se utilizará la primera técnica mencionada con diferentes mascarar para determinar la gama de colores del objeto y su área [2].

#### 3.1 Conversión de Colores BGR a HSV

En los sistemas computacionales existen varios modelos para representar un color, uno de los más sencillos y utilizados por los sistemas computacionales son el modelo de representación en RGB o BGR, el cual se basa en los tres colores principales (Rojo, Verde, Azul) basados en la intensidad o nivel en un pixel de alguno de estos colores, o en la combinación de ellos para determinar un color derivado de los colores RGB, como por ejemplo, el color rojo se representa del siguiente modo (255,0,0), para un sistema (RGB) con niveles de 0 a 255 (8 bits), en donde se tiene un nivel máximo del rojo que equivale a un 255 y no hay presencia del color verde ni azul. Ahora, el caso para representar un color verde y azul respectivamente se tendría las siguientes codificaciones (0,255,0) y (0,0,255), lo que permite en la combinación de las intensidades de estos tres colores para generar toda la gama de colores disponibles y que se puedan representar según la cantidad de bits [23]. Por otra parte, existe otro modelo más utilizado en el procesamiento digital de imágenes, el cual es el modelo HSV, en cual se representa un color por medio de su Matiz, Saturación y Luminosidad, este modelo tiene la particularidad de que su codificación de color se encuentra definido solo por la variable Matiz y tanto la saturación como la luminosidad son factores de que tan intenso es el color y lo oscuro o claro que puede ser el color a determinar, por lo que lo hace uno de los modelos más apropiados para la umbralización de un pixel dentro de una imagen en cuanto a la característica de color (Figura 3).

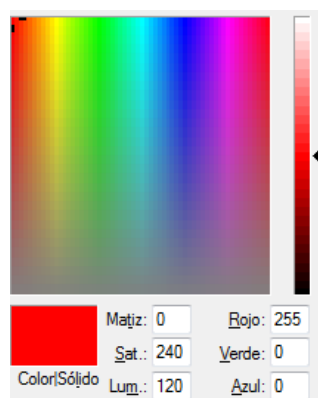


Figura 2. Ejemplo de codificación del color Rojo los Modelos HSV y BGR

#### 3.2 Establecimiento de rango de colores del objeto

Para el reconocimiento del color de un objeto, se hace necesario delimitar los límites de los rangos de color que contiene el objeto a encontrar dentro de la imagen, para ello se hace necesario evaluar los rangos y tonalidades de color que pueda tener el objeto con diferentes tipos de luz, lo anterior, con el fin de tener un rango de colores que pueda contener la mayor cantidad de pixeles del objeto dentro de la imagen, en aras de obtener una imagen binarizada y así ser procesada con mayor facilidad. Una imagen binarizada se compone por una imagen que solo contiene dos colores en cada uno de los pixeles, normalmente definidos por un 1 y un 0 o blanco y negro, con la finalidad de tener solo dos factores de decisión en cada pixel de la imagen para su posterior procesamiento, lo que se entiende en procesamiento de imágenes como mascara (Figura 4).



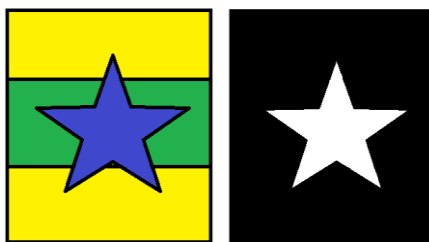


Figura 3. Ejemplo de una imagen binarizada para el color Azul

### 3.3 Transformaciones morfológicas en una imagen

Las transformaciones morfológicas en una imagen tienen un papel importante a la hora de hacer un procesamiento digital de imágenes, puesto que algunas veces al capturar una imagen, estas no se encuentran en condiciones ideales de luz, foco y en algunos casos presencia de ruido en la imagen, por esta razón la librería OpenCV dispone de diversas transformaciones morfológicas que pueden ayudar en algunos casos a mejorar la imagen con el fin de obtener una nueva imagen más idónea para su proceso, algunas de ellas son: Erosion, Dilation, Opening, Closing, Morphological Gradient, Top Hat, Black Hat. A continuación, se presenta un ejemplo de la transformación morfológica Opening [2], la cual puede ayudar a eliminar el ruido de la imagen (Figura 5).



Figura 5. Transformación morfológica Opening sobre una imagen binarizada ([https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py\\_tutorials/py\\_tutorials.html](https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_tutorials.html))

### 3.4 Contornos sobre una imagen

Los contornos sobre una imagen son una curva que encierra todos los puntos continuos del mismo color, esta técnica es una herramienta útil para el análisis de formas y la detección y el reconocimiento de objetos, la instrucción de contornos en OpenCV se debe utilizar bajo imágenes binarizadas, con el fin de agrupar los conjuntos de píxeles del mismo tipo, esta técnica se utiliza como punto de partida para encontrar el contorno del objeto y su ubicación dentro del fotograma, además, permite calcular el área del contorno encontrado, generando un área aproximada del objeto a buscar (Figura 6).



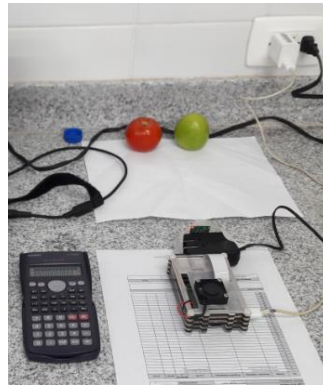
Figura 4. Contorno con OpenCV sobre una máscara de color rojo

## 4. DISEÑO DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE TOMATES POR TAMAÑO Y MADURACIÓN

El desarrollo del algoritmo implementado en Python con la librería OpenCV se diseñó bajo diferentes etapas o pasos para llevar a cabo el reconocimiento del fruto del tomate por tamaño y maduración, para ello, fue necesario aplicar las diferentes técnicas mencionadas anteriormente. A continuación, se muestran los pasos que se ejecutaron para su desarrollo.

### 4.1 Captura de la imagen en un ambiente controlado

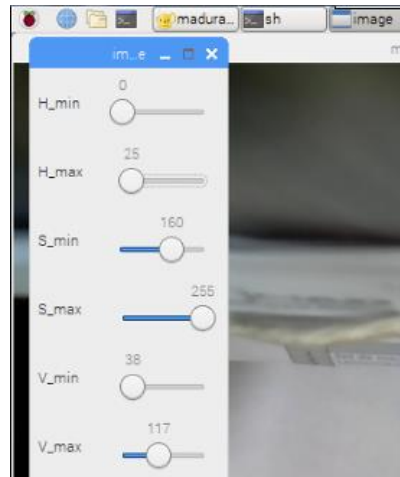
La adquisición de la imagen del objeto a procesar se basó en la captura de fotogramas por medio de la Raspicam y la tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B en un ambiente controlado, para ello fue necesario implementar un pequeño estudio (Figura 7) para tratar de mantener las condiciones de luz del ambiente constante y un fondo de un solo color, además, se hizo necesario tener un punto de referencia del objeto buscado y la distancia de la cámara, lo anterior para tener un punto fijo en cada medición del tomate y así poder determinar un área aproximada con menor porcentaje de error.



**Figura 5.** Captura de la imagen con la Raspicam

#### 4.2 Calibración de las tonalidades de maduración en los tomates

La imagen capturada consiste en una trama de 15 fotogramas, los cuales como primera medida se hace necesario la conversión de BGR a HSV para poder desarrollar un mejor proceso de análisis de la imagen, como proceso intermedio antes de la binarización de la imagen, se hizo necesario realizar una calibración de cada una de las máscaras para reconocer dos tipos de estados, maduro y verde, con el fin de tener el ancho de espectro de colores correspondientes a cada uno de estos estados, para llevar a cabo esta función, se tomaron como referencia 50 tomates maduros en diferentes puntos de su etapa de maduración y 50 tomates verdes, en aras de tener una amplia gama de tonalidades y hacer una máscara de acuerdo a los criterios de maduración, por otra parte, se realizó un algoritmo adicional para realizar la calibración de las máscaras para así tener la tabla patrón de los rangos de medición (Figura 8).



**Figura 6.** Barras de calibración para la detección de niveles HSV para los tonos de color de maduración de tomates

La calibración de la gama de colores correspondiente al punto de maduración (Tonalidades rojas), fue necesario realizar dos máscaras para este tono de color, puesto que las gamas de colores del rojo se encuentran a los dos extremos del espectro de tonalidades en HSV. Como proceso final se hace necesario realizar la suma de las dos máscaras resultantes del color rojo y así obtener una única máscara para esta tonalidad (Figura 9).



**Figura 9.** Mascara Rojo 1, Mascara Rojo 2 y máscaras rojas sumadas

#### 4.3 Tabla de valores promedio de los niveles HSV para el estado de maduración del tomate

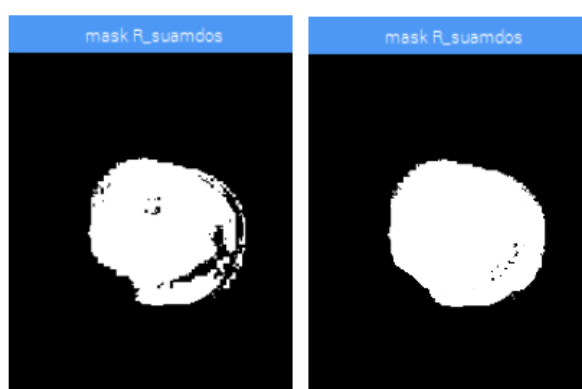
Al realizar el tamizaje de los 50 tomates maduros y 50 tomates verdes en diferentes etapas de su maduración, se logró determinar los límites de cada una de las máscaras para el reconocimiento de cada uno de los dos estados del tomate objeto de esta investigación, permitiendo tener un patrón de colores como base para el algoritmo de reconocimiento de la maduración de tomates. A continuación, en la Tabla 1 se muestran de valores obtenidos al realizar el tamizaje.

**Tabla 13.** Límites para los niveles HSV para cada mascara

Estado de Maduración	Mascara	Límites	Nivel H	Nivel S	Nivel V
Tomate Maduro	Mascara rojo 1	Límite inferior	0	65	75
		Límite superior	12	255	255
	Mascara rojo 2	Límite inferior	116	193	4
		Límite superior	255	255	246
Tomate Verde	Mascara verde	Límite inferior	20	77	84
		Límite superior	75	255	205

#### 4.4 Aplicación de transformaciones morfológicas

En la siguiente etapa del algoritmo se realizó la aplicación de diferentes transformaciones morfológicas para mejora la calidad de la imagen en cuanto a textura y forma, con el fin de llevar a cada una de las máscaras a una aproximación cercana a la imagen real, en este apartado se realizaron las transformaciones morfológicas en el siguiente orden: Closing, para completar algunos pixeles no reconocidos dentro de la máscara, seguido de Dilation con el fin de seguir completando los puntos no reconocidos en cada mascara cuando se realiza la umbralización por color. Después de realizar dichas transformaciones, se obtuvo una aproximación de 83% de la imagen real sin aplicar ninguna transformación, hasta llegar al 94% de aproximación (Figura 10) después de aplicar las transformaciones morfológicas.



**Figura 10.** Mascara antes y después de aplicar las transformaciones morfológicas

#### 4.5 Determinación del contorno del objeto

El algoritmo a este punto ya tiene una aproximación clara y definida del objeto que desea reconocer, pero hasta este momento no se ha determinado el contorno que encierra cada una de las máscaras. Para ello se utiliza la función cv2.findContours de OpenCV (Figura 11) a cada mascara para encontrar todos los contornos, posteriormente, es necesario hacer una comparación de todos los contornos encontrados de la misma masca y delimitarlos por tamaño, lo anterior con el fin de eliminar porciones de contorno por fuera de la imagen y solo seleccionar el contorno que tenga el mayor tamaño, esta técnica es utilizada para determinar un único contorno para cada mascara, además, permite tener una visión clara de ella, lo que permite imprimir los contornos en la imagen original.



**Figura 11.** Contornos de las máscaras maduro y verde

#### 4.6 Determinación del área aproximada del tomate

Para la determinación del área aproximada de cada tomate se hace necesario tener como referencia la distancia del tomate a reconocer y la Raspicam, para este caso todas las mediciones del área se hicieron a 25 cm de distancia, para realizar un cálculo aproximado del área, para ello se hicieron cortes transversales de 20 tomates y se hizo su respectiva medición hallando un área aproximada de manera teórica para luego compararla con el tamaño de cada mascara, así se puede obtener una formula aproximada entre ambas mediciones, adicionalmente, se implementó el comando Contour Approximation de OpenCV como punto de comparación, obteniendo un cálculo del área de la sección trasversal aproximada con un error menor al 4,13%(Figura 12).



Figura 72. Calculo del área aproximada del tomate

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este punto de la investigación denotan la factibilidad de usar el sistema de bajo costo, basado en una tarjeta Raspberry Pi 3 Modelo B con el sistema operativo Raspbian y el uso de la librería OpenCV, en aras de realizar el reconocimiento de imágenes dentro de un ambiente controlado, lo anterior debido a que en la actualidad se presentan tiempos de aproximadamente 1,1 segundos en el procesamiento completo del algoritmo. Por otra parte, cuando se realizan procesos bajo ambientes no controlados, se hace necesario aplicar una mayor cantidad de transformaciones morfológicas y otras funciones que posee OpenCV, lo que incrementa el tiempo de procesamiento del sistema.

Los resultados obtenidos del área de la sección transversal de los tomates son satisfactorias, puesto que se tiene un error cercano al 4% respecto del tomate real y cada una de las máscaras, en este momento, vale la pena aclarar que esta seguirá siendo un área aproximada, ya que para encontrar un volumen o una masa aproximada del tomate será necesario como mínimo tomar dos imágenes del tomate con cámaras ubicadas a 90 grados una de la otra, esto se debe realizar debido a que la textura del tomate no es totalmente esférica, con la implementación de esta configuración se espera minimizar el error y mejorar la selección del tomate por un tamaño adecuado.

Por otra parte, este trabajo no ha culminado actualmente, lo que se ha documentado hasta el momento se centró en el reconocimiento y procesamiento de imágenes, parte del sistema que tiene la mayor complejidad y dedicación en esta investigación, además, el reconocimiento del fruto en este caso será una condición para generar una señal que se emitirá por los puertos GPIO de la Raspberry al sistema de control y potencia que se desarrollará en una tarjeta Arduino.

Finalmente, el procesamiento digital de imágenes es una técnica que consume una gran cantidad de hardware. Para esta investigación y el algoritmo implementado, se encontró que la carga del procesador en la Raspberry Pi 3 fue cercana al 48%, lo que se espera que para un procesamiento de imágenes más robusto no sería factible la implementación de una Raspberry Pi para llevar tareas que necesiten procesamiento en tiempo real, para ello ya se recomendaría utilizar un computador embebido con mejores prestaciones, como por ejemplo uno con procesador Intel I5 o I7, para obtener mejores resultados. Por otra parte, cabe resaltar que existen otras alternativas para mejorar el rendimiento de una Raspberry Pi, la cual es conectarle un disco duro ya sea mecánico o de estado sólido, lo que podría llegar a aumentar la velocidad de procesamiento hasta 2.5 veces más rápido en comparación con la tarjeta microSD en donde se encuentra actualmente el sistema operativo de la Raspberry, lo anterior debido a que la velocidad de transferencia de datos de una microSD Clase 10, es más baja que la de un disco duro conectada por un puerto USB 2.0.

## REFERENCIAS

- [1] Acero, Á., Cano, A. & Builes, J. (2015). Sistema de clasificación por visión artificial de mangos tipo Tommy. *Revista UIS Ingenierías* 14(1), 21-31.
- [2] Mordvintsev, A. & Abid, K. (2017). [OpenCV-Python Tutorials](#). Online [Feb 2018].
- [3] Bird, S., Klein, E. & Loper, E. (2009). *Natural language processing with Python: analyzing text with the natural language toolkit*. O'Reilly Media.
- [4] Elfring, J. (2013). [Image Processing Using OpenCV](#). Online [Feb 2018].
- [5] García, G. et al. (2015). *Learning image processing with opencv*. Packt Publishing Ltd.
- [6] Kochláň, M. et al. (2014). WSN for traffic monitoring using Raspberry Pi board. In *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*.
- [7] Komarudin, A., Teguh, A. & Atmadja, W. (2015). Designing License Plate Identification through Digital Images with OpenCV. *Procedia Computer Science* 59, 468-472.
- [8] Kirby, J. Chapman, L. & Chapman, V. (2018). Assessing the Raspberry Pi as a low-cost alternative for acquisition of near infrared hemispherical digital imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* 259, 232-239.
- [9] Lander, G. et al. (2009). Appion: an integrated, database-driven pipeline to facilitate EM image processing. *Journal of structural biology* 166(1), 95-102.
- [10] Mordvintsev, A. & Abid, K. (2017). [OpenCV-Python Tutorials](#). Online [Mar 2018].
- [11] OpenCV (2018). [OpenCV](#). Online [Feb 2018].
- [12] Osroosh, Y., Khot, L. & Peters, T. (2018). Economical thermal-RGB imaging system for monitoring agricultural crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 147, 34-43.
- [13] Parker, J. (2010). *Algorithms for image processing and computer vision*. John Wiley & Sons.
- [14] Qureshi, B. et al. (2016). Performance of a Low Cost Hadoop Cluster for Image Analysis in Cloud Robotics Environment. *Procedia Computer Science* 82, 90-98.
- [15] Raspberry PI Foundation. (2018). [Raspberry PI](#). Raspberry PI Foundation. Online [Mar 2018].
- [16] Richardson, M. & Wallace, S. (2012). *Getting started with raspberry PI*. O'Reilly Media, Inc.
- [17] Rodríguez, A., Figueredo, J. & Chica, J. (2018). Economic and environmental benefits in the production of photovoltaic solar electric energy using a solar tracking system in the municipality of Acacias - Meta (Colombia). *International Journal of Engineering and Technology* 10(2), 345-352.
- [18] Santacoloma, G., Cifuentes, J. & Sánchez, L. (2007). Selección de características orientada a sistemas de reconocimiento de granos maduros de café. *Scientia et technica* 3(35), 139-144.
- [19] Seidenari, L. & Lisanti, G. (2010). [Image Processing with OpenCV](#). Online [Feb 2018].
- [20] Sugano, H. & Miyamoto, R. (2010). Highly optimized implementation of OpenCV for the Cell Broadband Engine. *Computer Vision and Image Understanding* 114(11), 1273-1281.
- [21] Umesh, P. (2012). *Image Processing in Python*. CSI Communications.
- [22] Van der Walt, S. et al. (2014). Scikit-image: Image processing in Python. *Peerj* 2, e453.
- [23] Yan, Y. & Huang, L. (2014). Large-scale image processing research cloud. In *The Fifth International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization*.
- [24] Yu, Q. et al. (2004). Ch OpenCV for interactive open architecture computer vision. *Advances in Engineering Software* 35(8-9), 527-536.

# Evaluación de equipos electro-electrónicos desarrollados en Colombia con respecto al cumplimiento de la normatividad internacional para certificación de productos

André Laverde<sup>1</sup>  
Arley Delgado<sup>2</sup>  
SENA  
Bogotá – Colombia

En este capítulo se muestra una evaluación de tres productos electro-electrónicos de manufactura nacional, aplicando las normas internacionales IEC (60601-1, 61010-1, 62477-1). El objetivo del estudio es observar el grado de cumplimiento de las normas por estos equipos de construcción nacional y promover el uso de estas normas para el diseño y producción de equipo electro-electrónico en el país.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) es la entidad gubernamental encargada para la vigilancia, control, venta, distribución y uso de los equipos médicos, tanto para entidades de carácter público como privado. El INVIMA también establece los lineamientos con relación a la importación, producción y comercialización de equipos electrónicos orientados al campo de la salud, por medio de los decretos 4725 del 2005 [1] y 582 de 2017 [2]. Para equipos importados el INVIMA exige al representante de la marca en el país, o comercializador, un certificado de conformidad. Éste se obtiene cuando el equipo pasa por una serie de pruebas realizadas por un laboratorio acreditado. Las pruebas que realizan estos laboratorios acreditados, son especificadas por la norma internacional IEC 60601[3], emitida por la International Electrotechnical Comisión (IEC). La IEC es una organización de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.

Sin embargo, para los equipos elaborados con manufactura nacional, al productor solo se le puede exigir la presentación de un documento que evidencie las pruebas realizadas en el país, de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 60601. Ésta norma es emitida por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). La norma NTC es homologa a la original emitida por la IEC. La razón para no exigir la norma IEC en el territorio colombiano, es debido al alto costo que implicaría él tener un laboratorio acreditado con la norma IEC 60601 para el desarrollo de pruebas en equipos electrónicos.

Además, se identifican dos falencias en el proceso de vigilancia por parte del INVIMA. Lo primero es que esta entidad no tiene la capacidad de verificar la idoneidad del certificado internacional de los equipos ingresados al país, así como de las pruebas locales realizadas acordes con la norma NTC para equipos nacionales. El segundo problema es que el INVIMA tampoco puede acreditar laboratorios nacionales para que puedan hacer este tipo de pruebas de certificación. Con tal panorama, existe una doble problemática para este tipo de dispositivos desarrollados con manufactura nacional, el primero es que los usuarios finales (pacientes), podrían estar usando dispositivos que no cumplen con la normatividad, y su vida podría estar en riesgo al usar estos dispositivos.

Este problema se relaciona a que los productores nacionales no se encuentran en las mismas condiciones de competitividad que los productores internacionales, ya que los procesos de certificación, ya sean nacionales o internacionales, representan un costo elevado con relación a la producción del equipo mismo, lo que a veces desencadena en algunos casos, en la falsedad en los certificados presentados por los productores de este tipo de equipos. El panorama puede ser aún peor en otros sectores de la industria colombiana, diferentes al mencionado, ya que no se cuenta con un marco de referencia regulatorio riguroso en su cumplimiento, respecto al diseño de productos, como es el caso del sector electro-electrónico y sus diferentes segmentos: telecomunicaciones, electrónica industrial, automotriz, seguridad, agropecuario, energía, iluminación, instrumentación, automatización y control [4]. Lo anterior propicia que este sector de la Industria Nacional se encuentre en desventaja ante los países que si cumple con estas normativas y regulaciones internacionales.

El cumplimiento de la normatividad es fundamental ya que aporta a la competitividad del sector industrial a nivel internacional, y por otra parte permite asegurar la robustez, calidad y seguridad de los equipos electro-electrónicos para los usuarios finales [5]. Estas normas se concentran específicamente, en la seguridad eléctrica (S.E.), la cual enmarca un conjunto de parámetros que deben ser evaluados para la protección a estos usuarios, entre estos se tienen: el riesgo ante descargas o choques eléctricos, los cuales pueden resultar en quemaduras, lesiones, calambres musculares, paro respiratorio, paro cardíaco o una mezcla de los dos últimos como es un paro cardiorrespiratorio [6].

Actualmente la S.E. en el país es un área incipiente, donde se destacan algunos trabajos realizados a equipos biomédicos importados. Sin embargo, la mayoría de las entidades ya sean de tipo gubernamental o privado, educativo o técnico, solo realizan labores de adaptación de las normas internacionales a los lineamientos estatales, más no lo relacionado a los mecanismos de cumplimiento de estas normativas [7, 10]. Esto podría definirse como una de las

---

<sup>1</sup> ag6@misena.edu.co

<sup>2</sup> jadelgado993@misena.edu.co

causas responsables que la industria nacional tenga un rezago en la producción de equipos electro-electrónicos. También debe destacarse la poca articulación entre la academia y la industria [8].

Debido a lo anterior, el grupo de investigación GICS, del SENA -Centro de Electricidad Electrónica y Telecomunicaciones (SENA CEET), decidió emprender la iniciativa de realizar un estudio aplicado de las normas para S.E., que la comisión electrotécnica internacional (IEC) en sus estándares (IEC 60601-1, IEC 61010-1 y IEC 62477-1) exige para equipos electro-electrónicos. Para tal fin, se realizó el estudio, enfocado en equipos electrónicos diseñados y fabricados por tres empresas colombianas. Con el objetivo principal de evaluar las prácticas, en diseño e implementación de equipo electrónico, y si éstas cumplen con los estándares de la norma, así como aportar a la formación de los productores de equipos electro-electrónicos nacionales, ingenieros, técnicos y a empresas de este sector, también a los aprendices y demás personal del SENA de la línea de electricidad, electrónica y telecomunicaciones.

El capítulo está dividido en cinco secciones, en la primera sección se realizó una contextualización de la problemática relacionada con la S.E en el país, la sección 2 que se presenta a continuación, muestra los conceptos de S.E. para equipos electrónicos, en esta parte se da una descripción de las pruebas, las normas aplicadas y su clasificación. En seguida, la sección 3 detalla el protocolo de pruebas utilizado, los materiales usados para cada prueba, y las pruebas realizadas en los equipos de las tres empresas nacionales. Posteriormente en la sección 4 se recopilan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Finalmente, en la sección 5 se realiza un análisis y discusión de los resultados obtenidos en las pruebas.

## **2. CONCEPTOS DE SEGURIDAD ELÉCTRICA**

La S.E. propende hacia las buenas prácticas para el diseño e implementación de equipo eléctrico y electrónico, representando una garantía de protección hacia los consumidores de este tipo de equipos. Los productores de equipos electro-electrónicos deben ser conscientes de los riesgos de manipulación que implica su equipo para los usuarios. Estos riesgos pueden ser de tipo eléctrico (choques o descargas eléctricas), de tipo físico (mecánico), de conflagración (incendio), e incluso generados por el polvo[9]. Para reducir los riesgos y garantizar la S.E. de un equipo, se deben superar cuatro tipos de pruebas:

- Conexión de tierra de protección (GB): Comprueba que existe una conexión a tierra eléctrica. Esto incluye a los metales conductivos expuestos en la superficie del equipo que deben estar aterrizados.
- Resistencia de aislamiento (IR): Mide la calidad del aislamiento del equipo. Por lo general es el encerramiento, caja o carcasa (en closure) del equipo, el cual está hecho de material plástico o metálico para la protección de los componentes del equipo.
- Corriente de fuga (LC): Verifica que la corriente que fluye entre la fuente de corriente alterna y la tierra no exceda el umbral especificado por la norma para cada tipo de equipo. Esta prueba es de especial interés en equipos biomédicos.
- Rigidez dieléctrica (HiPot): Mide el estado de colapso o soporte dieléctrico del aislamiento de zonas específicas del equipo, a la aplicación de un alto voltaje. Esta prueba es de tipo destructivo.

La aplicación de las normas de S.E. en la industria permite reducir los costos y los tiempos de producción de los equipos, genera confianza en los usuarios, ya que el equipo que se adquiere cumple con los estándares de seguridad enmarcados en las normas internacionales o nacionales (IEC o NTC). Permite que el sector industrial sea competitivo ante mercados internacionales.

Las normas de S.E. han tomado importancia en Colombia, aunque estas se apliquen de forma rigurosa en otros países, desde hace muchas décadas atrás, en Colombia, solo ciertos sectores del mercado electro-electrónico las ponen en práctica. Sin embargo, con la firma de tratados de libre comercio con Estados Unidos, algunos países de la comunidad europea y países asiáticos como Corea del Sur, han puesto sobre discusión la aplicación de las normas en todos los sectores de la industria eléctrica y electrónica del país. Ya que la firma de estos acuerdos implica el cumplimiento unilateral de dicha normatividad por parte de los países firmantes del tratado. Las regulaciones que se solicitan en algunos de los acuerdos tenemos: ANSI/UL en Estados Unidos de América y Canadá y la IEC/CENELEC/DIN(Alemania) en Europa [10, 11].

En Colombia el área de S.E. se ha centrado exclusivamente en los equipos del sector salud, debido a las exigencias por parte del INVIMA, como se mencionó en párrafos anteriores. A pesar de esto, las pruebas y sus protocolos de aplicación son poco conocidos [7, 12], menos aún difundidos y exigidos para otros sectores [4]. A continuación, se da una descripción de la normatividad y regulación actual sobre S.E, así como el tipo de equipos a los que se aplica.

### **2.1 Normas**

Las normas cubren diferentes tipos de equipos, y dependiendo de este se definen las pruebas a las que deben ser sometidos, los riesgos de uso, los requisitos de protección e integridad de los componentes y la documentación acompañante. En lo referente a S.E. las normas IEC determinan los protocolos y las pruebas para cada tipo de equipo,

en nuestro caso se procederán a la evaluación de tres tipos de equipos de manufactura nacional, aplicando las normas IEC 60601-1, 61010-1 y 62477-1. En la Tabla 1 se presenta una descripción de cada tipo de norma.

**Tabla 1.** Normas IEC que se evaluarán para los tres productos elaborados en Colombia

Norma	Descripción
IEC 60601-1 [3]	Equipos electro-médicos. Requisitos generales para la seguridad básica y funcionamiento. I.e., equipos de grado médico, electro cirugía, monitores de signos vitales, bombas de infusión, incubadoras.
IEC 61010-1 [13]	Requisitos de seguridad para equipos de control, medición, sensores y laboratorios. I.e., equipos de laboratorio, equipos para mediciones de variables físicas, eléctricas.
IEC 62477-1 [14]	Sistemas y equipos electrónicos de conversión de potencia, control, protección, monitoreo, medición, que no exceden 1000VAC.

## 2.2 Clasificación de equipos

Como se mencionó en el párrafo anterior, los equipos se clasifican de acuerdo con: el tipo, grado de protección, la clase de aislamiento, y el tipo de corrientes de fuga que presentan. Esta clasificación, extraída de las normas anteriores, permite determinarlas pruebas a las que deben ser sometidos y su intensidad de aplicación. A continuación, se presenta cada una de las clasificaciones aplicables.

1. *Tipo de protección:* Corresponde al blindaje del usuario contra la alimentación eléctrica externa a la que está conectado el equipo, que puede ser de alto voltaje, según la Tabla 2 de la norma IEC 60601 [3]:

**Tabla 2.** Clasificación según el tipo de protección contra descargas eléctricas

Clase	Descripción
Clase I	Equipo alimentado por una fuente externa de energía eléctrica.
Clase II	Energía de la red eléctrica domiciliar o industrial.
No clasificado	Equipo alimentado con una fuente de alimentación interna. Baterías.

El tipo de protección describe el riesgo que enfrenta el usuario en caso de una posible falla del aislamiento, cuando ésta conectado a la red eléctrica. Esta protección reside en la conexión de tierra eléctrica del aislamiento. Cuando la conexión a tierra eléctrica del aislamiento presenta un deterioro o no está presente, representa un riesgo latente y un potencial de falla. En este caso, la prueba de tierra (GB) verifica una trayectoria apropiada para proteger al usuario ante choques o descargas eléctricas. En caso de equipos de alimentación con baterías, y que presentan una tierra flotante (sin tierra física), no se presenta este tipo de riesgo.

2. *Grado de protección:* El equipo puede tener accesorios o partes aplicables en contacto directo con el paciente o usuario final, las cuales deben estar convenientemente aisladas para evitar posibles daños en este. El aislamiento de la parte aplicable define el grado de protección del equipo. En la Tabla 3 se da una descripción de este parámetro (tomada de la norma IEC 60601 [3]).

**Tabla 3.** Clasificación de acuerdo con el grado de protección contra descargas eléctricas

Parte aplicable	Descripción
B	El equipo tiene una parte con conexión adecuada y protección ante corrientes de fuga que puedan ocurrir. I.e., equipos de uso médico que no tienen parte conectada al paciente.
BF	El equipo tiene una parte o aditamento con entradas o accesorios aplicados al paciente mediante circuitos flotantes (tierra flotante) o que están aislados eléctricamente, pero no al órgano (corazón) o sistema que se esté monitoreando.
CF	Equipos que tienen una parte o accesorio con un alto grado de protección de corriente de fuga y esta parte se encuentra flotante, y se pueden conectar al órgano (corazón) o sistema que se esté monitoreando del paciente.

Las partes aplicables se emplean por lo general en equipos de uso médico. No obstante, muchos otros equipos tienen contacto con el usuario en su uso cotidiano, por ejemplo, el secador de cabello. En estos equipos se pueden presentar corrientes de fuga, o corrientes que involuntariamente pasan por el usuario. Estas corrientes son medidas en la prueba de corriente de fuga de usuario o paciente (LC).

3. *Tipo de corriente de fuga:* En un equipo en funcionamiento normal, debido a la alimentación eléctrica, se presentan voltajes y corrientes. Sin embargo, una corriente anormal es la que ocurre con una descarga eléctrica. La corriente de descarga circula a través de un elemento metálico como un cable o un circuito.

Del mismo modo, se presenta una corriente no funcional o parásita, llamada corriente de fuga [15]. Su origen es la acumulación de cargas en los elementos aislantes, como la cubierta dieléctrica (chaqueta) que recubre los cables. Cuando este material aislante se degrada por el uso y por el tiempo, se generan descargas eléctricas en la conexión de tierra, las cuales dependiendo del grado de deterioro del aislante (material dieléctrico) pueden ser representativas. La conexión a tierra y la envolvente son fundamentales para proteger y aislar al usuario de las corrientes de fugas [16].

La Tabla 4 presenta los diferentes tipos de corrientes de fuga. La peligrosidad relacionada a una intensidad de corriente para cualquier paciente (usuario final) son determinadas por la prueba de corriente de fuga (Leakage Current o LC).



**Tabla 4.** Tipos de Corrientes de Fuga

Tipo de corriente	Descripción
Fuga a tierra	Corriente circula desde la parte de red de alimentación, a través del aislamiento, hacia el conductor de protección de tierra.
Envolvente	Corriente que circula desde la envolvente, o parte conectada a tierra, a otra parte de la envolvente, diferente del conductor de protección de tierra y de una parte aplicable.
Auxiliar de paciente	Corriente que circula en el paciente, cuando usa normalmente el equipo y la parte aplicable o accesorio están en contacto con él, pero que no hace parte de la función normal del equipo.

4. *Aislamiento*: Los equipos pueden ser clasificados según la protección que brinda el envolvente o aislamiento al paciente o usuario final. En la Tabla 5 se muestra una clasificación y una breve descripción de acuerdo a las normas internacionales IEC [17].

**Tabla 5.** Clasificación del tipo de Aislamiento [17]

Clase de aislamiento	Descripción
Clase 0	La protección consiste en un aislamiento básico únicamente para la protección de choques eléctricos (una envolvente que encierra las partes activas o energizadas). No hay mecanismo de aterrizar las partes internas o externas.
Clase 0I	La protección depende de al menos un aislamiento básico e incorpora una terminal de tierra, pero sin un conductor de aterrizaje en el cable de alimentación.
Clase I	La protección contra las descargas eléctricas no depende únicamente del aislamiento básico (una envolvente que encierra las partes activas). Incluye una medida de seguridad adicional mediante la conexión del equipo a la tierra de protección. Estos son productos con toma de alimentación de tres clavijas o pines.
Clase II	La protección contra descargas eléctricas no depende solamente del aislamiento básico (encerramiento). Incluye medidas adicionales como aislamiento doble o reforzado (una caja (plástica o de otro material, o doble aislamiento). Al estar en el interior del encerramiento principal, aísla los elementos activos. En éste, no existe una conexión a tierra, pues se confía en las condiciones de la instalación. Los equipos clase II son provistos de un cable de conexión a toma de alimentación con dos clavijas.
Clase III	El equipo de Clase III, son los equipos que cuentan con fuentes de alimentación internas (pilas o baterías). La protección se basa en que no cuenta con tensiones a 25 VAC o 60 VDC. Si el equipo se carga por medio de la red de alimentación o cuenta con un transformador reductor de voltaje, se aplican las condiciones para clase I o II.

El aislamiento es verificado mediante dos tipos de pruebas, la primera de resistencia de aislamiento (IR) y la segunda de rigidez dieléctrica (HiPot). En caso de que el aislamiento básico falle, en la realización de estas dos pruebas, la conexión a la tierra de protección del equipo debe garantizar la seguridad del paciente. Una vez dada una clasificación del tipo de pruebas que especifica la norma [17]. Se define la metodología para la aplicación de las pruebas en los equipos de estudio.

### 3. MÉTODO

A partir de la revisión de los conceptos de S.E, las normas internacionales [17] y la clasificación de los equipos a probar, se elaboró un protocolo para la realización de las pruebas sobre los equipos de manufactura nacional. El objetivo principal es verificar el grado de cumplimiento de las normas internacionales por parte de estos equipos. Es importante aclarar que el protocolo implementado, se concentra en la realización de las siguientes pruebas: Corrientes de Fuga (LC), Resistencia del Aislamiento (IR) y Conexión a Tierra (GB). Las cuales consideramos como las importantes, aunque la norma sugiere más pruebas para la evaluación de equipos biomédicos.

#### 3.1 Equipo utilizado

Se utilizó el Analizador de Seguridad Eléctrica Chroma® 19032. Este es un equipo especializado para la verificación del cumplimiento de la norma para equipos en aplicaciones médicas (biomédicos), aplicaciones industriales, aplicaciones domésticas, aplicaciones de tecnologías de información y aplicaciones relacionadas a vehículos eléctricos. El equipo cuenta con accesorios para salvaguardar la vida e integridad del operario. También permite la ejecución de pruebas acordes con las normas: International Electrotechnical Commission (IEC), normas armonizadas europeas (EN), normas americanas Underwriter Laboratories (UL) y canadienses (CSA). El equipo está calibrado de fábrica y se cuenta con el certificado del mismo.

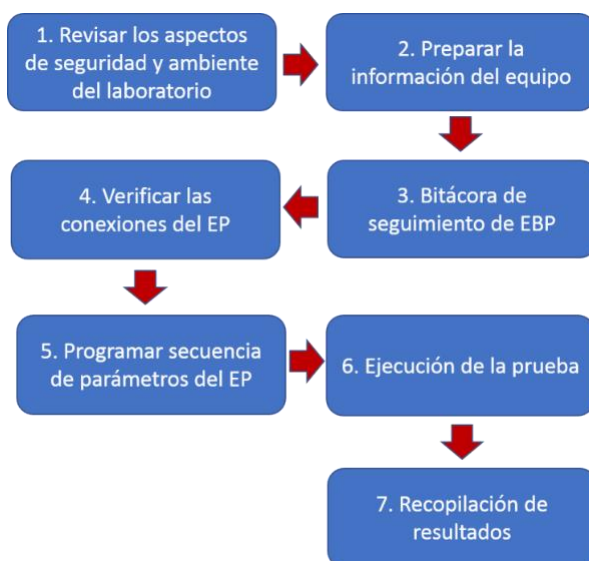
#### 3.2 Protocolo de pruebas

En este apartado se describirá en detalle el protocolo desarrollado. Para una mejor ilustración, en la Figura 1 se puede apreciar la secuencia de pasos del protocolo propuesto. A continuación, se detalla el protocolo desarrollado para la aplicación de las pruebas de seguridad eléctrica en los tres equipos bajo estudio. Para facilidad de interpretación y descripción del protocolo, los equipos a usar se mencionarán con siglas, así el analizador o equipo de pruebas será referenciado como EP y el equipo bajo pruebas como EBP.

1. Revisar los aspectos de seguridad y ambiente del laboratorio:

- 1.1 Evaluar los conocimientos básicos de seguridad del operador del equipo. Debe estar entrenado en técnicas de seguridad para el manejo de equipos de alta tensión, tipos de aislamientos y procedimientos de emergencia.

- 1.2 Revisar las condiciones del laboratorio de pruebas y el área de trabajo. Para el correcto funcionamiento de los equipos la humedad relativa debe estar en el rango 40% - 60% y la temperatura a  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . El área de trabajo debe estar limpia, organizada, y sin objetos metálicos.
- 1.3 Validar las conexiones del EP y EBP.
2. Preparar la información del equipo: Reconocimiento de los manuales del EBP, revisión de las características eléctricas y mecánicas como: corrientes, voltajes, frecuencia de operación, tipo de conexiones, tipo de carcasa y el tipo de usuario. Con el fin de identificarla norma aplicable y la clasificación según lo dispuesto por ésta.
3. Bitácora de seguimiento de EBP: Se registra en un documento el nombre del equipo, el fabricante, la fecha, la hora y las condiciones ambientales. Adicionalmente se configuran los parámetros de la prueba, como son el voltaje y la corriente. El primero por lo general es 10% más del valor nominal (normal). El segundo se configura alrededor de los  $10\mu\text{A}$  a  $15\text{mA}$ .
4. Verificar las conexiones del EP: Se utilizan los conectores en la secuencia indicada por el fabricante del EP. Se debe detectar que las conexiones no presenten signos de desgaste o fractura del material aislante, verificar las uniones y evitar solapamiento de cables, así como de los elementos metálicos externos.
5. Programar secuencia de parámetros del EP: Cada tipo de prueba se programa acorde con los parámetros definidos previamente por la norma. Las pruebas se programan en la siguiente secuencia: GB, IR y LC. La primera prueba por realizar es la de GB, porque si ésta falla, las demás no se podrán realizar.
6. Ejecución de la prueba: Se validan nuevamente las conexiones del EP y el EBP. Luego se da inicio a la prueba. Mientras ésta se ejecuta, el operador debe situarse a un (1) metro de distancia del EP y EBP. En caso de emergencia se acciona el botón de parada de emergencia.
7. Recopilación de resultados: Cuando se termina las pruebas, se debe quitar la alimentación del EP y desconectar todos los elementos. Posteriormente se recopilan los resultados medidos y los parámetros previamente programados.



**Figura 1.** Protocolo propuesto de seguridad eléctrica para equipo electrónicos colombianos

### 3.3 Caso de estudio 1: Equipo Biomédico de electro-estimulación

Los nombres de las empresas se han ocultado por cuestiones de confidencialidad. Sin embargo, se da una breve descripción de los antecedentes de la primera empresa que desarrollo el equipo bajo estudio. Esta fue fundada en el año 2000. Sus actividades se centran en la investigación, desarrollo y comercialización de equipos biomédicos. Ha sido beneficiaria de diferentes proyectos, por entidades como Colciencias, Fomipyme y la Cámara de Comercio de Bogotá.

El equipo sometido a pruebas fue un electro-estimulador muscular de 4 canales, programable y portátil. Se utiliza para la rehabilitación física de pacientes. Permite de una parte el tratamiento de dolores musculares, tanto leves como agudos, espasmos y parálisis. De otra parte, aporta en el fortalecimiento de tejidos. Este equipo opera a 110 VAC, a una frecuencia de 60Hz, y a una potencia de entrada de 45VA. A la salida entrega diferentes voltajes y frecuencias para la electro-estimulación, con una corriente máxima de 9.5mA. Se conforma por un cable de conexión a tierra, una carcasa plástica de Poliestireno, un acceso a 4 electrodos, una pantalla de visualización y programación de funciones. En la Tabla 6 muestra su descripción y clasificación, de acuerdo al tipo de protección, corriente de fuga y demás parámetros de interés.

**Tabla 6.** Descripción del EBP para la prueba de SE

Equipo	Norma Aplicada	Tipo de protección	Grado de protección	Corrientes de fuga	Clase de aislamiento
Biomédico	IEC 60601-1 Equipos electromédicos. Requisitos generales.	Clase I	Tipo BF	Tierra, envolvente, paciente	Clase I

### 3.4 Caso de estudio 2: Horno eléctrico con control de temperatura

El siguiente equipo puesto a prueba, fue un horno de laboratorio, usado en Odontología para el desarrollo de prótesis, materiales cerámicos, tratamientos biológicos y aplicaciones de joyería. La empresa nació en el año 2009 desarrollando y comercializando este tipo de equipos. El horno eléctrico cuenta con un control inteligente de temperatura. Éste opera a una tensión de 110-120VAC, con una corriente de 10A, a una frecuencia de 60Hz. Está compuesto de dos módulos: un módulo encargado de la parte de potencia y otro encargado de la parte de control de la temperatura. El módulo de potencia ésta construido con resistencias eléctricas, elementos refractarios, cerámicos y un sensor de temperatura. El módulo de control está constituido por un microcontrolador y una pantalla de visualización. En la Tabla 7 se presenta su clasificación dispuesta por la norma:

**Tabla 7.** Información preparada del EBP para la prueba de SE

Equipo	Norma Aplicada	Tipo de protección	Grado de protección	Corrientes de fuga	Clase de aislamiento
Horno de laboratorio	IEC 61010-1 Requerimientos de seguridad para equipos eléctricos de medición, control uso de laboratorio	Clase I	NA	Tierra, envolvente, paciente	Clase I

### 3.5 Caso de estudio 3: Equipo estabilizador de tensión eléctrica

La empresa desde hace más de tres décadas elabora equipos electrónicos para protección de sobre tensiones a equipos, máquinas y dispositivos de uso industrial. En su portafolio de equipos se encuentran: estabilizadores inteligentes, cargadores de baterías y sistemas de potencia ininterrumpida. Estos productos en algunas ocasiones han sido adaptados a las particularidades específicas de la industria colombiana. La garantía que ofrece el fabricante es de mínimo 20 años de funcionamiento continuo. El equipo sometido a pruebas fue un estabilizador inteligente, el cual es un protector de sobretensión. Su construcción se compone una carcasa metálica con puesta a tierra, un panel con botones de acceso para su configuración, y un fusible de protección. Sus características eléctricas son: potencia nominal de 1KW monofásica, una frecuencia de operación de 60Hz, y una salida 110VAC con una fluctuación de  $\pm 10\%$ . En la Tabla 8 se muestra las características del equipo, de acuerdo con la norma.

**Tabla 8.** Información preparada del EBP para la prueba de SE

Equipo	Norma Aplicada	Tipo de protección	Grado de protección	Corrientes de fuga	Clase de aislamiento
Estabilizador de energía	IEC 62477-1	Clase I	NA	Tierra, envolvente, paciente	Clase I

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 9 se muestra una recopilación de la información obtenida de las pruebas aplicadas a los tres tipos de equipos. Como se mencionó en los párrafos anteriores, cada equipo fue sometido a las pruebas de GB, IR y LC. En cada una de las columnas se comparan los valores de la norma con respecto a los valores registrados por el EP:

**Tabla 9.** Información preparada del EBP para la prueba de SE

Equipo	Norma	Prueba GB		Prueba de IR		Prueba de LC	
		Valor norma	Valor medido	Valor norma	Valor medido	Valor norma	Valor medido
Electro estimulador	IEC 60601-1	< 0.2 $\Omega$	NA*	>10M $\Omega$	NA	0.035mA	NA
Horno de laboratorio	IEC 61010-1	<0.2 $\Omega$	0.029 $\Omega$	>100M $\Omega$ 1 minuto	3.2G $\Omega$	3.5 mA	0.035mA
Estabilizador de energía	IEC 62477-1	< 0.2 $\Omega$	0.034m $\Omega$	>10M $\Omega$	3.1G	3.5mA	0.019mA

El valor de la prueba de GB corresponde a la resistencia de la conexión de tierra. De acuerdo con las normas, el valor no debe exceder los 0.2 ohmios. La prueba de IR corresponde a la resistencia del material de aislamiento (encerramiento). La norma estipula que deben ser mayores a 10M $\Omega$ , aunque lo deseable es que ubique en el rango de los Giga-ohmios (G $\Omega$ ). La corriente de fuga no debe superar el umbral de los 3.5mA, que es la corriente de descarga tolerable que puede circular por el encerramiento a tierra.

La prueba de resistencia a tierra GB se encuentra a menos del 25% del requisito de la norma. En consecuencia, esta baja resistencia a tierra facilitará el flujo de corriente en caso de falla. La resistencia de aislamiento IR presenta valores mayores que los reportados en la norma (30 veces). Esta alta resistencia significa una excelente protección para el usuario. Lo que representa que el material del aislamiento presenta una gran resistencia dieléctrica (capacidad de resistir grandes descargas sin perder su integridad). La corriente de fuga LC está en el rango del 10% del umbral máximo estipulado por la norma. Lo que representa una muy baja corriente en caso de descargas.

Los resultados muestran que el horno de laboratorio y el estabilizador de energía, cumplen los requisitos de la norma. El equipo electro-estimulador no cumple con los valores especificados por la norma. A partir de las pruebas realizadas se elaboró un informe técnico, el cual se envió a cada una de las empresas fabricantes de los equipos evaluados, para que ellas realicen las mejoras y correctivos respectivos a sus equipos, y en un futuro realizar las pruebas necesarias, si el fabricante las solicita.

## **5. CONCLUSIONES**

Es la primera vez que un estudio evalúa las normas aplicables a los equipos electrónicos diseñados, fabricados y comercializados en país. Las normas evaluadas fueron la IEC 60601 para el equipo electro-médico, la IEC 61010 para el horno de laboratorio, y la IEC 62477 para el estabilizador de tensión. Para cada uno de los equipos se realizaron las pruebas de seguridad eléctrica, con la realización de tres pruebas sugeridas por la norma como las pruebas: GB, LC e IR.

A pesar del desconocimiento de la norma por parte de las empresas que apoyaron el estudio, los resultados de las pruebas son favorables para dos de estas. Lo que significa que sus equipos podrían superar las pruebas de certificación internacional, si decidieran abordar un mercado externo.

Este trabajo constituye un aporte a la divulgación y conocimiento, con relación al proceso de aplicación de las normas IEC en diferentes equipos para la industria electro-electrónica. Con este trabajo se pretende concientizar a los fabricantes del sector en el conocimiento y como evaluar normas en equipos de fabricación nacional.

El uso de normas internacionales como la IEC, permite que los equipos de manufactura y diseño nacional puedan ser competitivos ante mercados internacionales, ya que ofrecen confiabilidad al usuario. Lo anterior es especialmente relevante para dos empresas del estudio, que están iniciando actividades comerciales en países vecinos.

Aunque este primer estudio se realizó con solo tres equipos, se pudo constatar que las empresas colombianas que desarrollan equipo electro-electrónico realizan un esfuerzo significativo para que sus productos cumplan con las normas de S.E. Así desconozcan las normas y no cuenten con un laboratorio certificado para la realización de las pruebas que exige la norma.

Es necesario ampliar el estudio a un mayor número de muestras ( $\leq 10$ ) por cada tipo de equipo, para realizar una evaluación más detallada. Sin embargo, este primero sirvió de base para la realización de un protocolo tentativo de pruebas en equipos de manufactura nacional, el cual pueda ser implementado en el sector productivo.

## REFERENCIAS

- [1] Min Salud (2005). Decreto 4725 de 2005. Ministerio de Salud y Protección Social.
- [2] Min Salud (2017). Decreto 582 de 2017. Ministerio de Salud y Protección Social.
- [3] IEC (2005). IEC 60601-1 Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for basic safety and essential performance. International Electrotechnical Commissionp. 777.
- [4] Zuluaga, D., Castillo, D. & Mayorquin, R. (2015). Prospectiva tecnológica de la industria electro electrónica de Bogotá y Cundinamarca. Publicaciones Universidad Sergio Arboleda
- [5] Pauling, F. (2015). Why Perform Electrical Safety Testing. Chroma Systems Solutions.
- [6] Lohbeck, D. (2004). Safety isolation protects users and electronic instruments. ProQuest Cent. 49(20), 59-68.
- [7] Salazar, A. & Cuervo, D. (2013). Protocolo de pruebas de seguridad eléctrica para equipos electromédicos: caso de estudio de equipos de telemedicina. Revista de Ingeniería Universidad de los Andes 38, 27-32.
- [8] Carrillo, A., Sánchez, M. & Villalobos, J. (2016). Plan Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación para el desarrollo del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones TIC 2017-2022. Colciencias.
- [9] Martens, J., Johnson, G. & So. P. (2006). Design considerations for consumer products utilizing high voltage. In IEEE Symposium on Product Safety Engineering
- [10] C. S. Solutions. (2002). Electrical Safety Testing Reference Guide. C. S. Solutions.
- [11] Kervill, G. (1998). Practical Guide to Low Voltage Directive. Elsevier.
- [12] Llamas, L., Meza, L. & Parra, H. (2006). Fundamentos para el diseño de la prueba de seguridad electrica para equipo biomedico con base en la norma NTC-ISO-IEC-60601-1. Scientia Et Technica 12(30), 321-326.
- [13] IEC (2010). IEC 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission.
- [14] IEC (2012). IEC 62477-1 Safety requirements for power electronic converter systems and equipment. International Electrotechnical Commission.
- [15] Nute, R. & Fellow, L. (2017). Grounding / Earthing Revisited. In IEEE Symposium on Product Compliance Engineering
- [16] Mammano, B. (2013). Safety Considerations in Power Supply Design. Texas Instruments.
- [17] Roman, D. (2015). Introduction to IEC 60335 – Household and similar electrical appliances - Safety. Colgate-Palmolive Company.

# Masificación de mediciones y acceso a datos de telemetría sobre calidad del aire, para toma de decisiones en ciudades inteligentes

Carlos Gómez<sup>1</sup>  
Guillermo Valencia<sup>2</sup>  
Valeria Fonseca<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Universitaria Agustiniiana  
<sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá – Colombia

En la actualidad el 49.5% de la población mundial cuenta con servicio de internet en sus dispositivos móviles, sin embargo, debido a factores como el precio de este servicio y sus limitaciones respecto a consumo de datos, las redes WiFi siguen siendo ampliamente usadas. Es por lo anterior que las redes Wifi siguen teniendo una gran cobertura y varias de ellas son patrocinadas por empresas de telecomunicaciones y gobiernos. Teniendo en cuenta estas redes y el hecho de que la organización mundial de la salud ha identificado como una fuente importante de enfermedades humanas, la concentración alta de aire contaminado, en este capítulo se describe la creación de un dispositivo de medición de calidad del aire, que esté conectado a los *accesspoint* de las redes y de esta forma lograr que los ciudadanos y las organizaciones gubernamentales tengan acceso a los datos recolectados, para que sean fuente de información para toma de decisiones personales y creación de políticas públicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de redes bajo estándar IEEE 802.11, o Wifi se ha venido extendiendo ampliamente dada la difusión de dispositivos móviles y el uso de Wifi en bandas de frecuencias de libre uso. Para el año 2016 el 99.7% de la población mundial tenía acceso a dispositivos móviles para uso de voz y el 49.5% también contaba con servicio de internet móvil en el mismo equipo [1]. Se estima que el 80% de los equipos móviles actuales son teléfonos inteligentes [2]. Sin embargo, dadas las tarifas de las suscripciones a internet móvil y sus limitaciones en cuanto a la cantidad de tráfico que pueden usar, las redes Wifi siguen siendo una solución ampliamente usada. En algunos casos se han empezado a desplegar grandes redes Wifi metropolitanas patrocinadas por los gobiernos y empresas de telecomunicaciones [3].

Las redes Wifi implican una gran infraestructura que ha sido desarrollada y desplegada en los últimos años y que ofrece oportunidades para nuevos usos y aplicaciones. Así como se han creado proyectos de infraestructura Wifi exclusiva, han empezado a aparecer nuevas opciones para reutilizar la infraestructura privada para dar acceso comunitario a Internet. Vidales [3] habla sobre el Wifi público metropolitano basado en la idea de usar los equipos de acceso a internet privado de las casas y oficinas, para aprovechar sus capacidades técnicas y crear redes comunitarias administradas por la ISP y que den acceso básico y gratuito a las comunidades. Otra opción de redes Wifi de amplio despliegue es propuesta por Vanderhulst G [4] bajo el nombre de WiFly; una aplicación que permite conectar automáticamente a los usuarios a redes locales que se despliegan en entornos privados.

En el año 2016 Tapashetti [5] construyó un dispositivo para medir en entornos internos la concentración de CO y gases HCHO, las mediciones se compartían a través de la nube a cualquier dispositivo inalámbrico para que de esta forma pudiera ser notificado cuando las concentraciones de estos gases superaban los límites permitidos. Para lo anterior se usó el Marvell 88MW302 el cual consta de un microcontrolador Cortex-M4, un módulo de WIFI 802.11n, puertos de entrada y salida con interfaces SPI, I2C, UART, I2S, PWM, ADC, DAC; estos permitieron la comunicación con los sensores. Para compartir la información se usó una plataforma de nube de Amazon Web Services llamada AWS IOT la cual permite a varios dispositivos interactuar fácilmente y de manera segura.

Si lo que se desea es conocer la calidad del aire en un entorno externo serían necesarios varios dispositivos realizando mediciones, es por lo anterior que en el 2016 Joy Dutta [6] propone un sistema que con la ayuda de voluntarios recolecta información y crea índices de la calidad del aire y con lo anterior crea un mapa de las áreas en las que se encuentran estos voluntarios; ellos deben llevar el dispositivo que el autor desarrolló (AQMD) y un teléfono inteligente. El AQMD o Air Quality Monitoring Device consiste en un Arduino pro mini, un módulo celular (HC - 05), dos sensores de calidad del aire (MQ 135) y una batería. Cuando hay una variación en la medición realizada el Arduino notifica al teléfono inteligente a través del módulo bluetooth, para el teléfono desarrollaron una aplicación en Android la cual recolecta la información, la envía a un servicio en la nube y provee el mapa con los indicadores de calidad del aire. El servicio de la nube que usaron fue ThingSpeak el cual permite almacenar, analizar y graficar la información.

Si se desea que las mediciones y por lo tanto la monitorización de las variables del aire se realice de forma constante se debe garantizar una constante alimentación eléctrica, es por lo anterior que Mitar Simic [7] propone un sistema que cuente con una unidad de carga basada en paneles solares. El sistema mide temperatura, humedad relativa

<sup>1</sup> andres.gomezr@uniagustiniana.edu.co

<sup>2</sup> guillermo.valenciap@uniagustiniana.edu.co

<sup>3</sup> vfonsecad@unal.edu.co

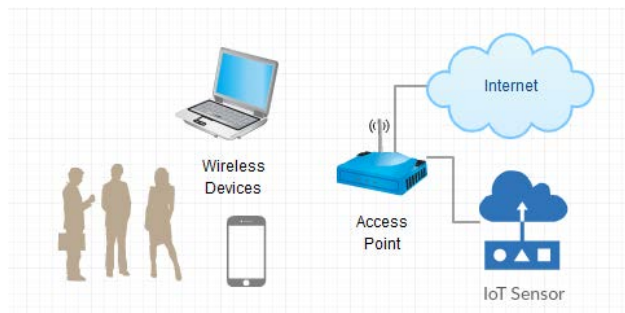
presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOC), temperatura del agua y niveles de PH. Para esto se usó un microcontrolador ATmega128, una pantalla LCD, un teclado y una memoria SD, sensor de temperatura y humedad relativa SHT11 y el sensor MQ 135. El sistema de carga de la batería consta de un panel solar y un cargador de baterías de litio ion. Para que la información estuviera disponible en tiempo real se usó un Arduino Uno y un módulo Ethernet los cuales envían la información cada 5 segundos a la IOT Foundation usando el protocolo MQTT y usando Bluemix se grafica en tiempo real la información.

## 2. MÉTODO

Este proyecto se ha trabajado sobre las siguientes ideas:

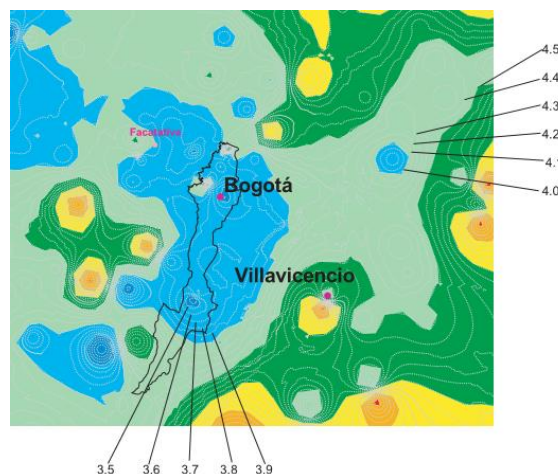
1. Usar la infraestructura actual de Wifi para soportar una gran infraestructura pública y comunitaria de monitoreo y conocimiento sobre la calidad del aire.
2. Usar energía solar para la alimentación eléctrica de los nodos Wifi.
3. Crear dispositivos de monitoreo de calidad del aire que se puedan usar en cualquier entorno, principalmente en ambientes de interiores privados donde la contaminación del aire no es medida por las entidades públicas.
4. Crear un ciclo de interacción donde los ciudadanos realicen monitoreo de la calidad del aire, junto con las instituciones gubernamentales y ambos tengan acceso a los datos recolectados como mecanismo de toma de decisiones personales y fuente de información para políticas públicas.
5. Dar información adicional, como proyección de sitios menos contaminados y recomendaciones a los usuarios finales.

Usar la infraestructura actual implica aprovechar las conexiones eléctricas y de datos actuales de los nodos Wifi públicos y privados. Es decir, usar los canales de internet para transportar la información de telemetría deseada, simplemente agregando un dispositivo que pueda enviar información usando protocolo ethernet al nodo Wifi, como se muestra en la Figura 1 en donde el dispositivo que puede capturar información de la calidad del aire es llamado Sensor IoT - Internet of Things.



**Figura 1.** Dispositivo IoT adicionado a un nodo Wifi

Respecto a la carga eléctrica y de datos que implica el uso de este sensor, en la sección de resultados se presentan las pruebas realizadas. Se diseñó un sistema de alimentación eléctrica teniendo en cuenta las condiciones de radiación solar de una zona como la que representa una zona ecuatorial y específicamente la ciudad de Bogotá. En la Figura 2 se puede observar un mapa solar de Colombia con el promedio multianual de la radiación solar incidente sobre todo el territorio colombiano para los meses de mayo y junio respectivamente. Mediante las convenciones mostradas en el mapa se indica la intensidad de la radiación solar dada en KWh/m<sup>2</sup> día. La unidad de la energía utilizada es la de kilovatio hora lo cual es equivalente a 3.600 kilojulios. Bogotá presenta niveles de 3.5 y 4.0 KW/m<sup>2</sup> día, para mayo y junio.



**Figura 2.** Radiación Solar en Bogotá Valor Promedio Multianual [8]

Dada la información mencionada, se toma la radiación promedio y se divide entre la radiación solar incidente que se usa para calibrar los módulos (1 kW/m<sup>2</sup>) y se obtiene la cantidad de horas sol pico (HSP) como se ve en la ecuación (1).

$$HSP = \frac{\text{map solar radiation}}{1KW/m^2} \quad (1)$$

Se calcula la cantidad de paneles solares, tomando como referencia paneles individuales de 120W, representado en la ecuación (2). Se asume una potencia de 280 Watts, como la necesaria para alimentar un equipo Access Point estándar y el dispositivo IoT mencionado anteriormente. Numero de módulos Np = (energía necesaria) / (HSP \* rendimiento de trabajo \* potencia pico del módulo).

$$Np = \frac{280}{3.5 \times 0.8 \times 100} = 1 \quad (2)$$

Donde el rendimiento de trabajo asume una depreciación de la calidad del panel debido a factores como la obstrucción por suciedad. Con lo anterior es posible crear un nodo Wifi + IoT alimentado por energía solar, lo cual es una alternativa pública y privada para desplegar una gran cantidad de sensores y dispositivos y aumenten la cobertura de las redes Wifi. No obstante, el dispositivo IoT que captura la información de distintas variables ambientales, está diseñado también para actuar en interiores que es precisamente donde actualmente no se tiene monitoreo oficial, además que es el ambiente en que las personas permanecen la mayor cantidad de tiempo al día.

El dispositivo IoT que se diseñó para realizar las mediciones y enviarlas a la nube está compuesto por un Arduino UNO, un módulo Ethernet, sensores de gas, temperatura, humedad y luz. El sensor de gas que se utilizó fue el MQ135, este permite medir diferentes tipos de gases entre ellos CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>2</sub>, los cuales según la OMS son esenciales para determinar la calidad del aire. Este sensor envía la información de forma digital y analógica, teniendo en cuenta que la medición digital se limita a decir si hay o no presencia de gases, se decidió usar la salida analógica a la cual se le puede hacer un tratamiento matemático el cual depende de la resistencia de carga que se le conecta, la resistencia interna del sensor y unas curvas especificadas en el datasheet del sensor para distinguir un gas entre todos los que este percibe.

En la parte de arriba de la Figura 3 se muestran las curvas que describen el comportamiento del sensor MQ135 de acuerdo con cada uno de los gases que él puede medir y en la imagen de la parte de abajo se muestra únicamente la curva del CO<sub>2</sub> después de hacerle una regresión matemática. La ecuación que se muestra es la que se usa en el Arduino para calcular la concentración de CO<sub>2</sub>. En la Figura 3 Rs es la resistencia interna del sensor MQ135 la cual puede ser calculada usando las lecturas de la entrada analógica del Arduino, si se considera RS y RL como un divisor de voltaje. RL es la resistencia de carga conectada al MQ135.

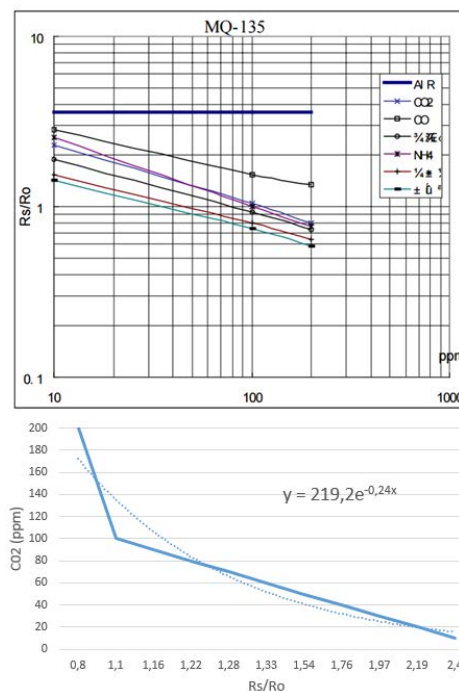
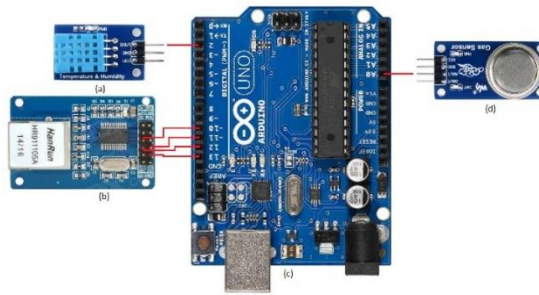


Figura 3. Curvas MQ135

Para las mediciones de humedad y temperatura se usó el sensor DHT11 el cual transmite las dos mediciones de forma digital y estas se recibieron usando funciones de una librería diseñada específicamente para este sensor, y para medir la luz se usó una foto resistencia. Esta información es reportada al sitio [app3.datawifi.co](http://app3.datawifi.co) para ser almacenada y posteriormente analizada, para esto se usó el módulo Ethernet ENC28J60. El montaje final se describe en la Figura 4.





**Figura 4.** Montaje final dispositivo de medición

Estos dispositivos se repartieron entre diferentes estudiantes la Universidad Agustiniiana quienes se ofrecieron para dejarlos conectados en sus hogares y de esta forma probar los dispositivos de medición y el sistema de almacenamiento de los datos, a cada dispositivo se le asignó un código de identificación para ser tenido en cuenta al momento de recibir y analizar la información. Los módulos que se muestran en la Figura 4 son el sensor de humedad y temperatura (a), modulo ethernet ENC28J60 (b), Arduino UNO (c) y el sensor de calidad del aire MQ135 (d).

### 3. MODELO DE ALMACENAMIENTO Y ACCESO A LOS DATOS

Dado que el modelo de captura de datos es replicable, es necesario construir una estructura de bajo costo de transporte de datos, pero con niveles de escalamiento y seguridad aceptables. Se propone un modo de transmisión basado en peticiones HTTP con estructura de datos JSON, transmisiones en texto plano, pero con verificador de integridad de información basado en el algoritmo MD5. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de paquete de datos asíncronos enviados desde cada nodo:

```
{ "node"
  { "provider2": "0002",
    "ID": "001122",
    "gas": "550",
    "temp": "34",
    "hum": "95",
    "lig": "120",
    "date": "2017-06-01-15:23:00",
    MD5: "f7a53d971a7237c3968c231251f68883"
  }
}
```

**Figura 5.** Ejemplo de objeto JSON

El objeto tiene la información que permite identificar su origen, el momento en el tiempo de la información de los sensores, el valor de cada medición y un hash de verificación de integridad de la información.

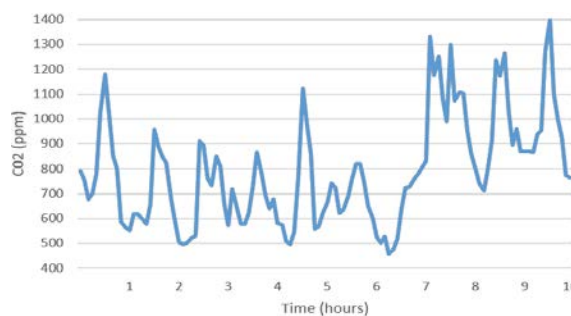
### 4. RESULTADOS

Se calculó la carga eléctrica y de datos del dispositivo IoT usado en un nodo Wifi. Las características del dispositivo usado son: 1) Circuito controlado por un microcontrolador de 8 bits, 2) Interfaz Ethernet, y 3) 4 sensores. La tabla 1 muestra la carga que implica este dispositivo al nodo Wifi.

**Tabla 1.** Consumo de datos y energía eléctrica del dispositivo IoT implementado

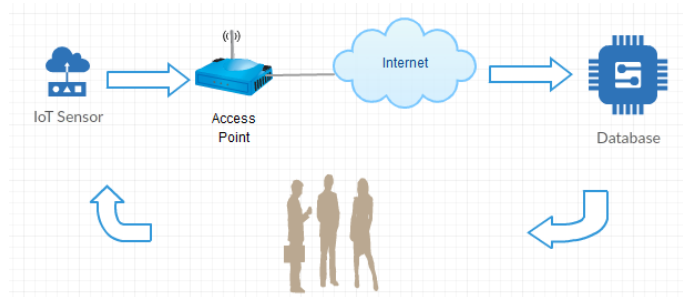
	Datos	Energía
Dispositivo IoT	0,45 KBytes/minuto	2,5 Watt

El dispositivo ha estado en pruebas durante cinco días en los cuales ha estado reportando información sobre las mediciones de CO2, luz, temperatura y humedad. Por problemas con el prestador de servicio de internet, durante los cinco días el dispositivo estuvo aproximadamente 18 horas sin transmitir información, lo que hizo necesario el tratamiento de la información almacenada para no presentar errores al momento de su análisis. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del CO2 en un hogar.



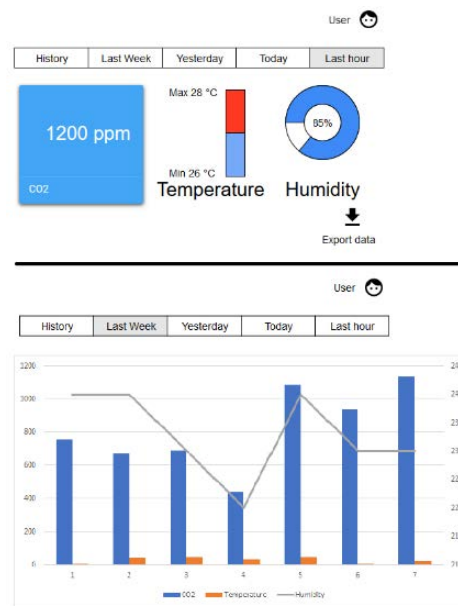
**Figura 6.** Mediciones de CO2

El diseño completo del sistema genera una experiencia cíclica en donde los datos provienen del ciudadano y retornan al ciudadano, como se muestra en la Figura 7.



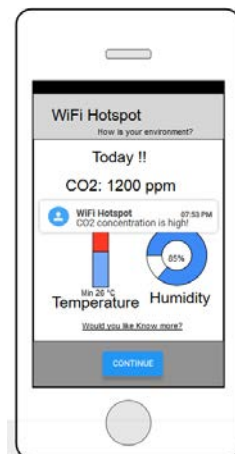
**Figura 7.** Filosofía de la gestión de las mediciones de calidad del medio ambiente

Se diseñaron 2 formas de interacción con los usuarios: Por un lado, el panel informativo (dashboard), que es una herramienta web de libre acceso por parte de los usuarios. Tiene información sobre mediciones de calidad del aire ordenada por tipo (interiores o exteriores), ubicación geográfica, historia y tipo de variables. Además, los datos son abiertos y descargables para que las personas o entidades interesadas puedan hacer análisis propios, identificar tendencias y tomar correctivos. La Figura 8 muestra un ejemplo del panel.



**Figura 8.** Dashboard web

La segunda interfaz desarrollada aprovecha las bondades de la propia red inalámbrica para mostrar a todo usuario que se conecte a dicha red inalámbrica un portal informativo (portal cautivo) en el que se da una breve información de la situación ambiental de la zona y se invita consultar mayores detalles en el panel web. Con esta interfaz se pretende crear conciencia a los ciudadanos que no han percitado los cambios en su medio ambiente y las posibles consecuencias que puedan traer además de dar recomendaciones de lugares menos contaminados cerca al suyo. En la Figura 9 se puede ver un ejemplo de la interfaz de portal cautivo.



**Figura 9.** Portal cautivo con mediciones ambientales de una zona

Además de lo anteriormente mencionado, se diseñó un software de análisis descriptivo y correlaciones de las variables ambientales que se midieron con el hardware desarrollado. La descripción del comportamiento de las mediciones se divide en tres secciones: visualización de series de tiempo univariadas con agrupamiento de datos, gráficos de nubes de puntos con curva de suavizamiento y matrices de correlaciones.

#### **4.1 Series de tiempo univariadas con agrupamiento de datos**

Cada una de las variables está medida en los mismos puntos de tiempo en intervalos de aproximadamente 18 a 30 segundos. Con el fin de crear series de tiempo univariadas que permitan visualizar el comportamiento de las variables en el tiempo, se realizó una agrupación de los datos para obtener medidas con intervalos de tiempo más amplios. En general, se puede elegir cualquier longitud de intervalo que se desee. Actualmente se puede agrupar los datos para obtener mediciones con intervalos de 5 minutos. Dependiendo del resultado de la serie de tiempo que se observe, es posible ajustar este valor para obtener intervalos más amplios o más angostos.

El agrupamiento de los datos consiste en crear una serie de puntos en el tiempo con la longitud de intervalo deseada, y clasificar las mediciones para determinar a qué intervalo corresponden. Una vez realizada esta asignación, se obtiene el promedio aritmético del grupo de observaciones. El resultado es una serie de tiempo de cada variable con una medición en cada punto del tiempo elegido (ej. cada 5 minutos).

Los gráficos resultantes son series de tiempo univariadas. En el eje horizontal se encuentra especificado el punto de tiempo de las mediciones ordenado y en el eje vertical se refiere el valor correspondiente de la variable. Se provee un gráfico para cada variable (Gas, Humedad, Temperatura y Luz). Con estas herramientas es posible determinar los comportamientos de las variables en el tiempo, la posible presencia del llamado efecto seasonal, el cual permite saber si la variable tiene los mismos altos y bajos en los mismos momentos del día cada día. Alternativamente, es posible determinar mediciones extremas o atípicas y determinar si estas se presentan esporádicamente, o si hay comportamientos atípicos a partir de algún momento específico. Estos tipos de comportamientos atípicos pueden ser a su vez relacionados con factores tales como la exactitud del aparato de medición, condiciones geográficas o sociales que puedan tener influencia en el resultado de la medición.

#### **4.2 Gráficos de nubes de puntos con curva de suavizamiento**

El segundo componente del análisis descriptivo y visual de los datos consiste en la construcción de gráficos de nubes de puntos, también conocidos como “scatter plots” con el fin de analizar el comportamiento entre parejas de variables. Además de las cuatro variables mencionadas anteriormente (Gas, Temperatura, Humedad y Luz), se calcularon las variables Hora y Jornada. La primera hace referencia la hora en que se tomó la medición en el día, tomando valores entre 1 y 24. La variable Jornada es una variable categórica que clasifica las mediciones en tres grupos: “Mañana” (6am - 12pm), “Tarde” (12pm - 6pm) y “Noche” (6pm - 6am).

Cada gráfico se construye eligiendo una variable para el eje horizontal y otra para el eje vertical, mostrando un punto para cada observación en ambas variables. En el gráfico, los puntos están clasificados de acuerdo con la variable Jornada. El objetivo de este gráfico es determinar cómo se relacionan las dos variables elegidas, si hay una relación proporcional directa o inversa, una relación no lineal, y cómo cambian estas relaciones dependiendo de la jornada de medición. En algunos casos es posible que dos variables se relacionen de manera diferente en jornadas diferentes.

Adicionalmente, los gráficos proveen una curva de suavizamiento para las dos variables en el gráfico, cuyo objetivo es capturar la relación existente entre ellas, la cual puede ser lineal o no lineal. Estas curvas de suavizamiento son calculadas con los llamados métodos de regresión local que se utilizan para describir relaciones entre variables. Estos métodos ajustan modelos de regresión en pequeños conjuntos de los datos a lo largo del rango de las variables. La curva resultante es la unión de todas las regresiones realizadas obteniendo así una función que describe las posibles curvaturas existentes en diferentes zonas del rango de las variables, en contraste con una única regresión lineal la cual ajusta una línea para todo el conjunto de datos.

#### **4.3 Matrices de correlaciones**

El tercer elemento de este análisis es denominado matriz de correlaciones. La correlación es una medida descriptiva que provee información del tipo de relación lineal entre dos variables. Estas correlaciones son elementos numéricos descriptivos de análisis que apoyan los elementos visuales explicados anteriormente.

Para un par de variables, la correlación es una medida descriptiva que toma valores entre -1 y 1. Cuando la medida es negativa y se acerca a -1 indica que la relación entre las dos variables consideradas es lineal e inversamente proporcional (el aumento de una variable está relacionado con la disminución de la otra y viceversa). Cuando la medida es positiva acercándose a 1 indica que la relación es lineal y directamente proporcional (el aumento de una variable está relacionado con el aumento de la otra). Cuando la medida oscila alrededor de 0 indica que la relación lineal entre las dos variables es muy débil y el cambio en una variable no está necesariamente relacionado con el cambio proporcional en la otra variable.

Por reglas de uso general, se considera que valores de correlación mayores a 0.5 en valor absoluto indican relaciones fuertes (directas o inversas) y menores a 0.5 son consideradas relaciones lineales débiles o inexistentes. Sin embargo,

estas interpretaciones deben ser diferentes dependiendo del contexto de aplicación ya que las relaciones entre variables también están determinadas por factores externos que los datos no reflejan. Es posible que incluso valores mayores a 0.4 (en valor absoluto) den cuenta de una relación fuerte.

Esta interpretación puede ser resuelta de acuerdo con el conocimiento técnico sobre la relación de las variables. Si el investigador conoce y espera que las relaciones lineales sean fuertes de acuerdo con su conocimiento técnico, valores de correlación por encima de 0.6 (en valor absoluto) serían fuertes, pero si se sabe que es insólito encontrar una relación lineal entre dos variables consideradas, entonces valores de correlación por encima de 0.4 (en valor absoluto) serían ya considerados como relación lineal fuerte.

Una vez se calculan las correlaciones para cada par de variables, estos resultados se muestran en la llamada matriz de correlaciones, la cual es simétrica y contiene en las filas y en las columnas al conjunto de variables. Por lo tanto, el valor de la matriz correspondiente a Variable 1 y Variable 2 es el mismo que el valor para Variable 2 y Variable 1, el cual es la respectiva correlación. Los valores en la diagonal de la matriz corresponden a la desviación estándar de la variable. Una desviación estándar es una medida que tiene las mismas unidades de la variable, y se interpreta como la lejanía que existe entre los datos y el promedio de ellos (ej. En general, los datos se alejan del promedio en 5 unidades de medida).

El análisis por correlaciones se realizó agrupando los datos por jornada del día (mañana, tarde y noche), obteniendo una matriz de correlaciones por cada jornada, la cual contiene las correlaciones para el grupo de variables Gas, Luz, Temperatura, Humedad y Hora.

## **5. CONCLUSIONES**

Es necesario almacenar la información a transmitir cuando debido a fallo en la conexión esta no ha podido ser transmitida, ya que de no ser así se van a presentar vacíos en la información lo cual puede llevar a un error en el análisis de la misma.

La disposición abierta de “open data” permite que los ciudadanos sean quienes de forma individual o por medio de sus organizaciones sean quienes alimentan bases de información oficial y además usen los datos de ellos y otros para la toma de decisiones.

La metodología propuesta permite crear una amplia base de conocimiento sobre el estado de la contaminación del aire en interiores, lo cual es desconocido hasta hoy pues los esfuerzos de los gobiernos se ha centrado en crear instituciones que monitorean con equipos especializados solo ciertos puntos de exteriores.

## REFERENCIAS

- [1] ITU Development (2017). Key ICT indicators for developed and developing countries and the world. International Telecommunication Union.
- [2] Myanmar (2016). Myanmar witnesses increased demand for mobile communications. Oxford Business Group.
- [3] Vidales, P., Manecke, A. & Solariski, M. (2009). Metropolitan Public Wifi Access Based on Broadband Sharing. In Mexican International Conference on Computer Science.
- [4] Vanderhulst, G. & Trappeniers, L. (2012). Public Wifi Hotspots at Your Service. In IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops.
- [5] Tapashetti, A., Vegiraju, D. & Ogunfunmi, T. (2016). IoT-Enabled Air Quality Monitoring Device - A low cost smart health solution. In IEEE Global Humanitarian Technology Conference.
- [6] Dutta, J. et al. (2016). AirSense: Opportunistic Crowd-Sensing based Air quality monitoring system for smart city. In IEEE Sensors.
- [7] Simić, M. et al. (2016). Multi-Sensor System for Remote Environmental (air and water) quality monitoring. In 24th Telecommunications forum TELFOR 2016.
- [8] UPME (2017). [Radiación Solar en Colombia Valor Promedio Multianual](#). Online [Feb 2018].

# Estudio de uso del espectro radioeléctrico por parte de las estaciones de televisión digital terrestre colombiana, como paso para la cuantificación de los espacios en blanco TVWS

Carlos Gómez<sup>1</sup>  
Winston Barrios<sup>2</sup>  
Claudia Chacón<sup>3</sup>  
Universitaria Agustiniiana  
Bogotá – Colombia

La Televisión Digital Terrestre – TDT- es una tecnología moderna que permite mejorar la calidad de las transmisiones de televisión radiodifundida y que además permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico, considerado como un recurso escaso que es necesario aprovechar al máximo. La transición del servicio de TV análoga terrestre a TDT implica la reorganización del uso del espectro radioeléctrico lo cual ha abierto un debate internacional sobre la posibilidad de usar las frecuencias que tradicionalmente eran de uso exclusivo para este servicio de radiodifusión, para que puedan ser usadas por otros servicios a título secundario (sin exclusividad y respetando la integridad del servicio de televisión); este uso alternativo del espectro usado para la TV se conoce como *Espacios en blanco de TV o TV White Spaces TVWS*. Para poder impulsar el uso de tecnologías TVWS en el momento en que la TV terrestre análoga deje de ser radiada, lo inicial es determinar el actual uso del espectro radio eléctrico por parte del servicio de radiodifusión de TDT. Este trabajo presenta la metodología de análisis del uso del espectro radioeléctrico aplicado al caso real del territorio colombiano, basado en los datos provistos por la entidad RTVC (Radio Televisión Nacional de Colombia), encargada de la red nacional y regional de televisión pública colombiana.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de televisión digital terrestre bajo estándar DVB-T2 supone el mejoramiento en el uso del espectro radioeléctrico dada su capacidad para multiplexar video comprimido, audio y transmisiones simultáneas de datos en una misma emisión [1]. Un solo canal de 6 MHz puede ser usado para transmitir servicios móviles y fijos en los cuales se haga transmisiones de televisión de alta definición (HDTV), definición simple (SDTV) y servicios IP. El mejoramiento en el uso del espectro radioeléctrico es evidente ya que en el sistema de televisión análoga terrestre con estándares como el NTSC-M, cada uno de los canales de TV individuales hace uso de anchos de banda de 6 MHz. La multiplexación de servicios en TDT mencionada permite que por ejemplo para la transmisión de los canales públicos nacionales (canal institucional, señal Colombia y canal uno) que antes ocupaban 3 canales independientes de 6 MHz, es decir 18 MHz, ahora puedan ser transmitidos usando solo 1 canal de los mismos 6 MHz.

Con la adopción de la TDT se presenta un inevitable apagón de los sistemas de TV análoga, que conlleva a la disponibilidad de gran cantidad de espectro radioeléctrico que será dejado de usar. Esta situación es llamada el “dividendo digital”, y ha dado cabida al uso de estas bandas de frecuencia para el desarrollo de nuevos servicios móviles o servicios de transporte de datos [2]. Algunos países ya han apagado totalmente sus sistemas de televisión terrestre análogo y todo su sistema de radiodifusión es digital, lo cual les ha permitido prestar mayores servicios por medio del enlace de datos que supone la TDT [3] y reorganizar el uso de su espectro radioeléctrico. Es posible entender cómo será el uso del espectro radioeléctrico luego del apagón de la TV análoga por medio de la simulación de áreas de coberturas de cada estación de transmisión de TDT, y usar sistemas de información geográfica que ayuden a entender el uso geográfico del espectro, para identificar la disponibilidad regional de espacios en blanco de frecuencias de TV, o TVWS, para otros usos.

## 2. ANTECEDENTES

[4] realiza un estudio de cobertura de estaciones de TDT que usan el estándar DVB-T2 en el territorio de Rumania. Para este análisis los autores usan simulaciones de cobertura con 4 modelos de propagación diferentes: NTIA-ITS Longley Rice, ITU-R P.1546, Okumura-Hata-Davidson y ITU-R 525/526. Los resultados de las mediciones son comparados con mediciones hechas en campo. Bajo las condiciones estudiadas encuentran que el modelo empírico de Okumura-Hata-Davidson es el que produce resultados más cercanos a los valores medidos en campo [4].

En otro trabajo, [5] se realiza un estudio sobre la propagación de una señal de DVB-2 como parte de la evaluación de un modelo de propagación híbrido que combina elementos del modelo de propagación empírico Hata y el semideterminístico de Deygout66. Para la realización del estudio se colocó un transmisor en un cerro de la ciudad de Cali, Colombia, y se realizaron medidas de potencia de recepción en diferentes ubicaciones de la ciudad. Al realizar un análisis estadístico de los resultados, se observa que es posible mejorar el desempeño de los modelos semideterminísticos y empíricos, haciéndolos mejores que los modelos de herramientas comerciales y adecuados

---

<sup>1</sup> carlos.gomezr@uniagustiniana.edu.co

<sup>2</sup> winston.barrios@uniagustiniana.edu.co

<sup>3</sup> claudia.chacon@uniagustiniana.edu.co

para llevar a cabo la planificación y control en el escenario de la ciudad de Cali, y probablemente para ciudades con topología similar.

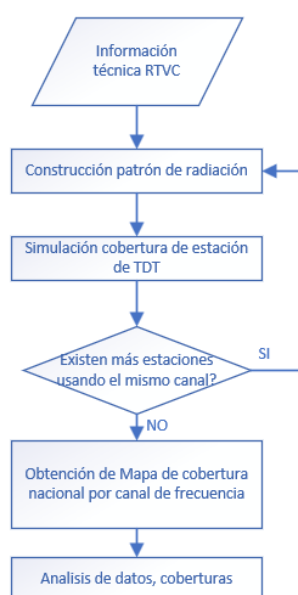
Aguilar et al. [6] realizaron un estudio de cobertura y compatibilidad electromagnética para la implementación de transmisores de televisión digital para la ciudad de Quito, la finalidad de este estudio fue identificar el área de cobertura del servicio de TDT y determinar qué sectores eran adecuados para situar las estaciones de relevo; se empleó como herramienta de análisis y simulación SIRENET teniendo en cuenta el estándar que implementó el país de Ecuador para TDT: ISDB-Tb. Se pudo destacar de este estudio que la huella de cobertura obtenida cumple las condiciones para la recepción de la TDT, y el resultado de las simulaciones electromagnéticas se evidenció que no hay interferencia co-canal o adyacente, en los canales de televisión analógica y digital. La simulación también logró determinar los espacios de la ciudad de Quito que cuentan con poca potencia de recepción y que constituyen “huecos” en la cobertura del servicio de TDT. Además, se realizó la verificación de que en una transmisión simultánea (simulcast) no se encuentra ningún tipo de afectación electromagnética y que es de gran beneficio para la red de televisión ecuatoriana.

Arévalo [7] realizó un estudio con tres modelos de cálculo, ITU - R 526, ITU - R 1546 y método Deygout en el simulador Xirio Online para la propagación de una red de televisión digital terrestre DVB - T2 en la ciudad de Bogotá, Colombia, con el fin de compararlo con mediciones reales en el terreno e identificar el método de cálculo más eficiente. El autor realizó mediciones en campo que usó como patrón para evaluar la eficiencia de las simulaciones de acuerdo a cada patrón de radiación. Después de los estudios realizados identificaron el modelo de cálculo ITU - R 526 como el más aproximado a los resultados reales con un promedio de error de 5.7 y el modelo ITU - R 1546 menos favorable con un promedio de error de 11.

El autor de [8] estudia el comportamiento de los modelos de propagación Longley-Rice, ITU-R P.1546 y Hata-Davidson para la predicción de cobertura de la primera versión del estándar DVB-T. El autor también realizó mediciones de potencia de recepción en cortas, medianas y largas distancias para evaluar la efectividad de cada uno de los modelos en función de la distancia. El autor encontró que el modelo Longley-Rice al usar datos de elevación de terreno precisos es el modelo más exacto, aunque también es el de mayor costo computacional. El modelo ITU-R P.1546 es muy preciso en cortas distancias, pero para distancias mayores a 50 km produce resultados con altos errores. El modelo Hata-Davidson es muy simple de implementar y es en promedio más exacto que el ITU-R P.1546, siendo lo suficientemente preciso para la mayoría de aplicaciones.

### 3. MÉTODO

Para el desarrollo del presente estudio se partió de información suministrada por la RTVC (Radio Televisión Nacional de Colombia) acerca de la implementación de la red nacional y regional de televisión pública colombiana; con esta información se realizó una serie de estudios simulados y se obtuvo información sobre el uso de las bandas de frecuencia de interés para la tecnología TDT en el territorio colombiano. En la Figura 1 se presenta un diagrama que explica el procedimiento metodológico aplicado a la información técnica de cada estación de TDT administrado por la RTVC.



**Figura 1.** Procedimiento metodológico aplicado a la información técnica de cada estación de TDT administrado por la RTVC

La información técnica proporcionada por la RTVC no posee uno de los factores más importantes para poder realizar correcta simulación de un sistema radiante para TDT, su patrón de radiación. Por lo anterior el primer proceso, luego de la organización de la información, es la reconstrucción teórica del patrón de radiación, que alimentará el software

de simulación de áreas de cobertura del servicio radiado de TDT. Con la reconstrucción del patrón de radiación de una estación de TDT se simula la huella de cobertura.

Dado a que la planeación del uso del espectro radioeléctrico prevé el uso de la misma banda de frecuencia en ubicaciones geográficas distantes, es necesario recopilar la simulación de cada sistema de radiación que use la misma frecuencia. Esto lleva a la creación de huellas de cobertura en la geografía nacional, el cual es el recurso que ayuda a entender el uso real de cada frecuencia de interés. Dados los mapas nacionales de coberturas simuladas es posible realizar análisis de datos que permitan identificar características comunes de la radiación de señales de TDT en el contexto de la regulación nacional.

#### 4. RED NACIONAL Y REGIONAL PUBLICA DE TDT

La operación nacional pública de canales en tecnología TDT es responsabilidad de la RTVC (Radio Televisión Nacional de Colombia), quien despliega a nivel nacional la infraestructura necesaria para radiar los siguientes servicios:

- Red Nacional pública: transmisión que usando solo 1 canal de 6 MHz radia los 3 canales públicos en todo el territorio colombiano, gracias a la multiplexación de canales de televisión que posibilita el estándar DVB-T2.
- Red Regional Pública. Transmisión que usando otra canal de 6 MHz diferente al de la red nacional, transmite de forma multiplexada los canales de cobertura regional de acuerdo a divisiones políticas nacionales.

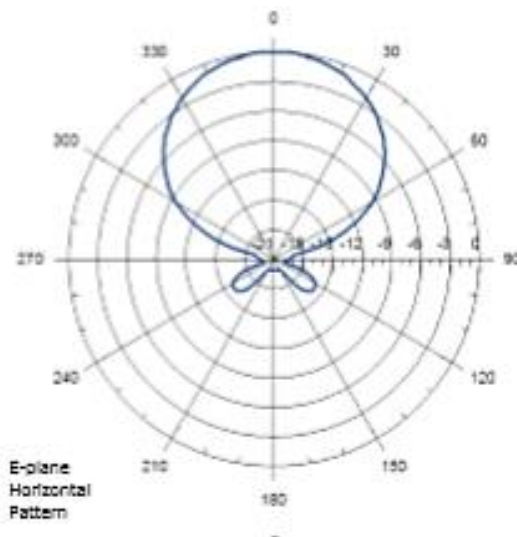
Dado lo anterior la operación completa de canales de televisión públicos de cobertura nacional y regional se concreta en el uso de 2 canales de 6 MHz en cada uno de los municipios nacionales. Esto quiere decir que ha sido necesario simular la cobertura de 2 canales diferentes en cada ubicación de cada estación de TDT [9]. La operación de TDT pública se hace desde 44 estaciones de transmisión que usualmente son ubicados en cerros con infraestructura de torres de sistemas de transmisión.

#### 5. SIMULACIÓN DE COBERTURA POR ESTACIÓN

Para la simulación de cada una de las estaciones de TDT se usó como base la información entregadas por la RTVC. En la tabla 1 se resume la información ejemplo que fue la base para cada simulación.

**Tabla 1.** Características técnicas de una estación de TDT, con los valores ejemplo de la estación Tres Cruces de Cali

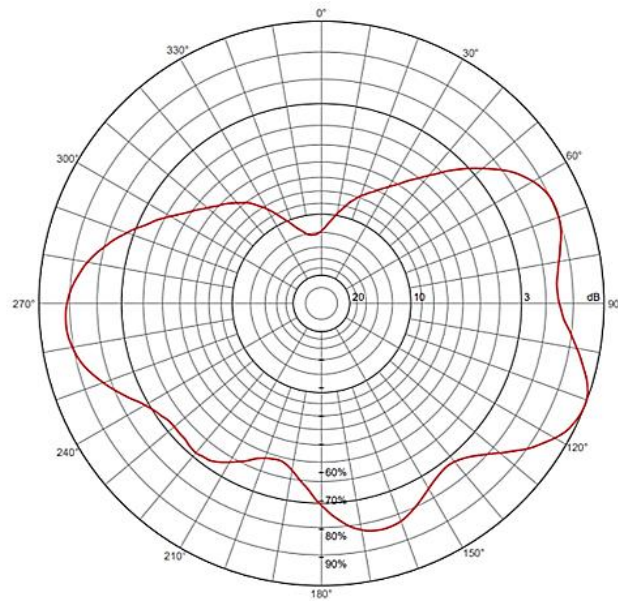
Propiedad	Ejemplo de Valor
Nombre de estación	Tres Cruces, Cali.
Latitud y longitud	3° 28' 4.75"N, 76°32' 45.2"W
Cota	1452 mts, Altura de la estación de telecomunicaciones en metros sobre el nivel del mar.
Potencia de TX (W)	2390 Watts,
Canal - Frecuencia	Canal 16, 482-488 MHz
Configuración	4:4:2 significa que tiene un arreglo de 4 antenas (conocidas como bahías) en 3 caras de la torre de telecomunicaciones.
Acimut	70:160:270. Ubicación en grados de la orientación de cada uno de los arreglos de antenas, respecto al norte geográfico
Tilt	3:3:2. Indica en grados, la inclinación de casa arreglo de antenas respecto al horizonte perpendicular a la tierra.
Ganancia Del Arreglo (dBd)	11.6 Ganancia en total del arreglo de antenas, respecto a un dipolo de media onda.
Altura Centro De Radiación (m)	43m. Altura a la que se ubica el sistema radiante (arreglo de antenas) respecto al piso de la torre de telecomunicaciones.
Perdidas ( CCA,LINEA TX,etc) (dB)	2,15 dB Pérdidas totales del sistema previa a la radiación, en Decibeles.
Antena individual	



Patrón de radiación horizontal de cada antena individual

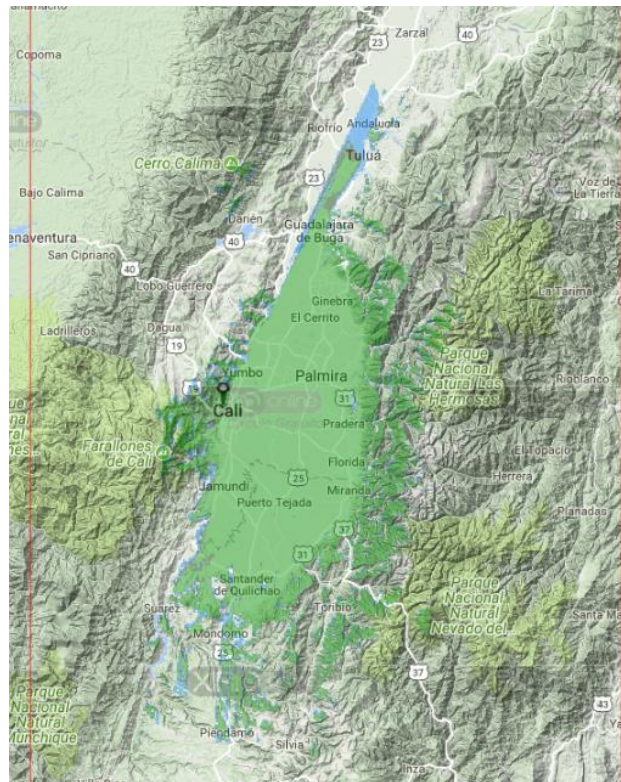


Con la información proporcionada es necesario reconstruir el patrón de radiación que genera cada arreglo de antenas. Para ello se sigue la guía de simulación provista en [10]. La Figura 2 contiene un patrón de radiación reconstruido para el ejemplo de la Tabla 1.



**Figura 2.** Patrón de radiación reconstruido para valores de Tabla 1

El modelo de propagación usado para la simulación de cobertura es el ITU-R 526-11 que se basa en el modelo de propagación en el espacio libre, pero tiene en cuenta los obstáculos en el trayecto y el fenómeno de difracción que se produce cuando las ondas radioeléctricas encuentran obstáculos. Es necesario clasificar los obstáculos y los tipos de terreno, por lo que la obstrucción puede emularse como obstáculo de borde de cuchilla simple, obstáculo redondeado simple, bordes doblemente aislados o múltiples cilindros aislados [11]. Usando todos los datos mencionado se logra simular la cobertura de la estación de televisión en las condiciones establecidas. En la Figura 3 se muestra la cobertura para las características del ejemplo de la Tabla 1 y el patrón de radiación de la Figura 2.



**Figura 3.** Cobertura simulada de ejemplo

Este procedimiento fue realizado en cada una de las 44 estaciones de TDT, para cada uno de los canales de transmisión definidos en la documentación de la TDT. Con los resultados individuales se han usado mapas de cartografía nacional uniendo las huellas de cobertura de cada una de las estaciones simuladas, con lo cual se obtienen los mapas de cobertura nacional de cada uno de los canales existentes.

## 6. ESTIMACIÓN DE COBERTURA EN EL TERRITORIO NACIONAL

Se obtuvo mapas consolidados de cobertura para los canales 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 33, 35, 38, 39, 40, 41, 44 y 48. En la Figura 4 se observa el caso de la huella de cobertura nacional para la operación de la red nacional y regional de televisión pública, en el canal 16.



Figura 4. Cobertura nacional del canal 16 para la operación de la red nacional y regional de televisión pública

## 7. RESULTADOS

A partir de la información recolectada es posible simular patrones de radiación de los distintos canales de televisión en el servicio de TDT en Colombia como se muestra en la Figura 5 y adicional a esto es posible la identificación de patrones típicos de comportamiento como lo son los patrones circulares, principalmente representados por las estaciones de Leticia y Simón Bolívar los cuales por la zona geográfica en la que se encuentran, que no poseen obstáculos de montañas, irradian de forma omnidireccional mostrando un círculo en su comportamiento. Otro patrón típico de comportamiento identificado son los semicírculos, principalmente representados por las estaciones de Cerro Kennedy, El Tigre y La Popa que al estar sobre una montaña e irradian a zonas llanas muestran un comportamiento de semicírculo. Las estaciones que se encuentran en valles o que irradian a una zona en medio de montañas muestran un patrón típico de elipse, siendo de distintos tamaños y formas gracias a las formaciones montañosas principales de Colombia, las cordilleras, algunas de las estaciones que representan estos patrones son Calatrava, El Cable y Bello.

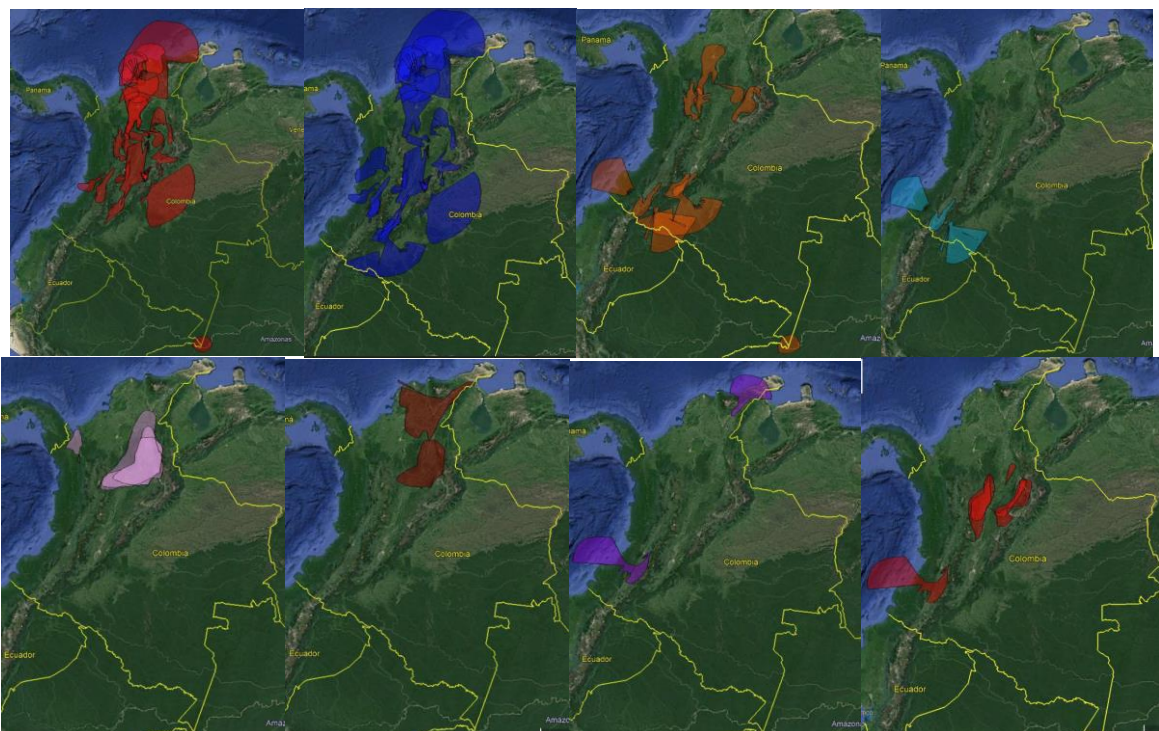


Figura 5. Cobertura nacional de los canales 16, 17, 18, 20, 27, 29, 33 y 35 para la operación de la red de televisión pública

Al unificar los distintos patrones de radiación en sus respectivos canales se identifican zonas no utilizadas por los servicios de TDT en Colombia. Las regiones que presentan mayor espacio inutilizado son la Orinoquia y el Amazonas. Aunque la gran mayoría de las manchas de cobertura obtenidas en los procesos de simulación no tienen una forma geométrica definida por situaciones que parten desde el propio patrón de radiación, hasta la topografía del terreno, si es posible identificar las máximas coberturas dadas por las partes principales de la huella obtenida. Se midió la distancia desde la ubicación de la estación de TDT hasta cada una de esas posiciones y se obtuvo así la relación que permite identificar las estaciones con mayor y menor cobertura, como se muestran en las Tablas 2 y 3.

**Tabla 2.** Estaciones de operación de canales nacionales, con mayor y menor distancia máxima de cobertura

Operación Nacional			
Mayor cobertura		Menor cobertura	
Estación	Distancia máx desde torre(Km)	Estación	Distancia Max desde torre(Km)
Galeras	240,79	Bello	24,29
Jurisdicción 1	244,49	Itagüí	35,47
El tigre	251,94	Pachavita	40,84
La rusia	273,8	Calatrava	55,87
Jurisdiccion 3	278,23	Cruz verde	55,92
Jurisdiccion 2	284,26	Simon Bolivar	59,98

**Tabla 3.** Estaciones de operación de canales regionales, con mayor y menor distancia máxima de cobertura

Operación regional			
Mayor cobertura		Menor cobertura	
Estación	Distancia max desde torre(km)	Estación	Distancia max desde torre(km)
Cerro Kennedy	239,02	Bello	32,89
Jurisdicción 1	239,56	Itagüí	37,46
Galeras	241,45	Pachavita	42,39
El tigre	253,09	Cruz verde	54,3
La Rusia	277,27	Leticia	55,16
Jurisdicción 2	292,76	Simón Bolívar	55,72

Se identificaron puntos de menor y mayor alcance de cobertura de radiación de las estaciones de TDT siendo Bello e Itagüí los de menor alcance de cobertura con 24,39 Km y 35,47 Km respectivamente en el canal de servicio nacional y 32,89 Km y 37,46 Km respectivamente sobre los canales de servicio regional. Las estaciones que presentan mayor alcance de cobertura sobre los canales de servicio nacional son las estaciones de Jurisdicción identificadas como 2 y 3, con 284,26 Km y 278,23 Km respectivamente y en los canales del servicio regional son las estaciones de Jurisdicción 2 y La Rusia con 292,76 Km y 277,27 Km respectivamente.

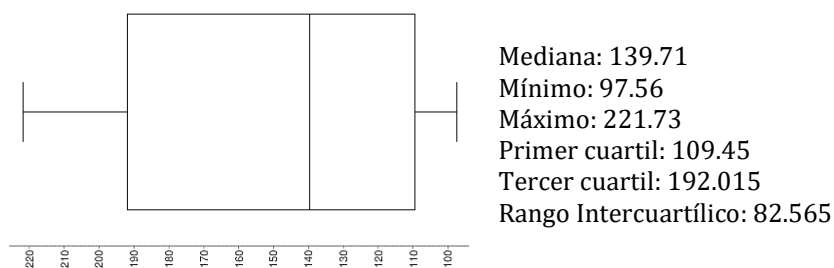
## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los canales más usados en los servicios de TDT son el 16 con 24 estaciones y el 17 con 21 estaciones. Los canales 21, 22, 24, 39, 40 y 48 son los menos usados. La Figura 6 muestra la cantidad de estaciones que usan cada canal.



**Figura 6.** Número de estaciones usado por canal

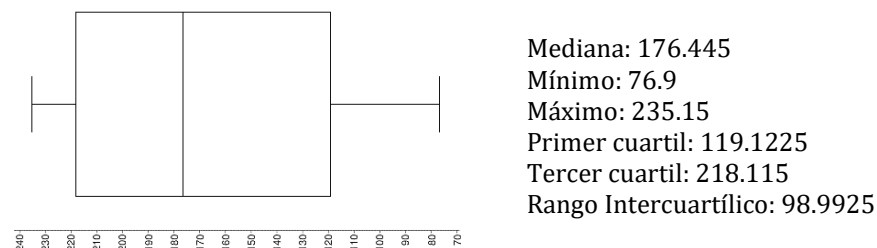
Dada la diversidad de resultados obtenidos se organizaron las estaciones según su potencia de transmisión, ya que es este uno de los principales factores para clasificar los tipos de estaciones, y se realizó un análisis de las distancias máximas de cobertura, logrando una gran variedad de distancias de cobertura para mismos valores de potencia, como se observan en las Figuras 7, 8 y 9. Se encuentra que el comportamiento de las distancias de cobertura de las estaciones de TV es similar con las 3 potencias de transmisión analizadas, como lo muestran los datos de la mediana y máximo de cada uno de los diagramas de *boxplot* de las Figuras 7, 8 y 9, por lo cual las grandes diferencias de distancias de cobertura están principalmente asociadas a mejores posiciones con menor cantidad de obstáculos, usualmente características de altos cerros.



**Figura 7.** Distribución de valores de distancias máximas de cobertura para transmisores con potencia de 5980 Watts



**Figura 8.** Distribución de valores de distancias máximas de cobertura para transmisores con potencia de 2390 Watts



**Figura 9.** Distribución de valores de distancias máximas de cobertura para transmisores con potencia de 754 Watts

## 9. CONCLUSIONES

La metodología planteada para el desarrollo de estudios de cobertura sobre el territorio nacional funciona y permite el análisis de uso espectral según la geografía, lo cual es un valioso insumo para el desarrollo de ejercicios de cuantificación de espectro libre.

La metodología planteada puede ser aplicada para cualquier servicio de TV radiodifundido, por lo cual se observa un trabajo futuro orientado al análisis en simultáneo del uso de espectro radioeléctrico en espacios geográficos, para las aún existentes estaciones de TV análogas, y que incluyan las operaciones nacionales y locales privadas. También puede ser usada la metodología para prevenir la interferencia co-canal y de canal adyacente en los servicios de TDT.

De los resultados obtenidos se destaca la gran importancia del diseño de patrones de radiación para orientar la radiodifusión hacia lugares geográficos determinados.

Se observó también que los canales inferiores de la banda UHF son los que más se han explotado para la radiodifusión de la TDT, con lo cual no podrán ser usados en la mayor cantidad de territorio urbano para aplicaciones de TVWS. También se observa que el principal diferenciador en la capacidad de extender la cobertura de una estación de TDT es su posición privilegiada (mayor altura y sin obstáculos) respecto a los territorios adyacentes.

## REFERENCIAS

- [1] Trujillo, M. (2013). An overview on the standard of digital video broadcasting – terrestrial. *Ingeniería y Competitividad*, Volumen 15(1), 37-47.
- [2] Rancy, F., Zilles, E. & Guitot, J. (2011). Transition to digital TV and digital dividend. In 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS).
- [3] Itagaki, T., Owens, T. & Orero, P. (2016). Digital TV accessibility — Analogue switch off in Europe and Africa. In IST-Africa Week Conference.
- [4] Martian, A. et al. (2017). DVB-T2 radio coverage analysis in Romania. In 25th Telecommunication Forum (TELFOR).
- [5] Navarro, A., Rojas, D. & Patiño, M. (2016). Digital terrestrial television measurement and coverage models comparison: Evaluation of measurements and simulations on urban environment for DVB-T2 signals. In IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI).
- [6] Aguilar, D. et al. (2016). Simulación y comprobación de cobertura y compatibilidad electromagnética de operadoras de transmisión de televisión digital para la ciudad de Quito. In IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM).
- [7] Arévalo, J. (2017). Simulation of Radiopropagation Coverage in a Fixed Reception Network of DVB-T2 Digital Terrestrial Television. In Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI).
- [8] Kasampalis, S. et al. (2014). Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. In International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB).
- [9] ANE (2016). Resolución 405 de 2016. Por la cual se modifica el Plan Técnico de Televisión para la planeación de las frecuencias del espectro atribuido al servicio de televisión radiodifundida en tecnología digital. Agencia Nacional del Espectro.
- [10] Kathrein (2018). [Antenna Selector and Configurator](#). Online [Mar 2018].
- [11] ITU (2013). Recommendation ITU-R P.526-13. Propagation by diffraction. International Telecommunications Union.

Claudia M. Hernández<sup>1</sup>

Víctor F. Miramá<sup>2</sup>

Virginia Solarte<sup>3</sup>

Universidad del Cauca  
Popayán – Colombia

En un entorno académico es importante tener la posibilidad de evaluar diferentes sistemas de telecomunicaciones, para estudiar sus características y funcionamiento, sin embargo, contar con laboratorios de sistemas de comunicaciones ópticos, inalámbricos, y satelitales, constituye un alto costo para una institución de educación pública. Como alternativa se tienen herramientas de simulación que permiten analizar el desempeño de diferentes sistemas de telecomunicaciones en un entorno académico, estas ayudan a comprender un sistema real de comunicaciones. En este capítulo se presentan el concepto de simulación y aspectos relacionados, además se realiza el análisis de diferentes metodologías de modelado y simulación empleadas para representar sistemas de telecomunicaciones a diferentes niveles. Finalmente se comparan dichas metodologías de acuerdo a un conjunto de criterios importantes para evaluar un sistema de comunicaciones mediante simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las herramientas de simulación permiten tener un acercamiento al funcionamiento de diferentes sistemas de telecomunicaciones en un entorno computacional. Existen herramientas de simulación con licencia libre que pueden emplearse para analizar el comportamiento a diferentes niveles de un sistema de telecomunicaciones en particular. Pero es indispensable el uso de una metodología de modelado y simulación que permita hacer un aprovechamiento eficiente de la simulación como herramienta para el aprendizaje. Diferentes autores proponen metodologías de modelado y simulación de sistemas de telecomunicaciones, sin embargo, es necesario realizar un análisis detallado del tipo de sistema a simular y los objetivos de la simulación para determinar la metodología más adecuada a un sistema en particular.

Existen diferentes tipos de simulaciones, y diferentes aproximaciones de modelado y metodologías, por lo tanto, es indispensable analizar cuáles pueden ser empleadas según los fines que persiga una simulación y según las características del sistema de telecomunicaciones bajo análisis. En la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones –FIET, de la Universidad del Cauca, se ha detectado la necesidad por parte de estudiantes y profesores, del análisis de diferentes metodologías de modelado y simulación de sistemas de telecomunicaciones, dado que esta herramienta se usa continuamente en laboratorios, cursos y trabajos de grado, pero no siempre se siguen los lineamientos indicados para hacer uso eficiente de esta herramienta de aprendizaje. Mediante este capítulo se presentan resultados del proyecto “Adaptación de Metodologías de Modelado y Simulación para Sistemas de Telecomunicaciones Fase 1”, desarrollado en la Universidad del Cauca, con este proyecto se buscaba incentivar la investigación, desarrollo e innovación dentro de la FIET mediante el uso metodologías de modelado y simulación en diferentes tipos de sistemas de telecomunicaciones. En la sección I se presenta el marco teórico, en la II la Metodología empleada para el desarrollo del proyecto, en la III los resultados y análisis y finalmente en la IV las conclusiones.

## 2. MARCO TEÓRICO

El primer paso para analizar el comportamiento de un sistema conlleva al desarrollo de un modelo, entendido como una abstracción de un sistema real para predecir y replicar su comportamiento, identifica las entradas y salidas del sistema y ofrece una representación matemática del mismo. La simulación se entiende como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él, para entender su comportamiento y/o evaluar estrategias para su operación y/o mejoramiento. La simulación tiene un papel importante en el diseño de un sistema de telecomunicaciones, permite el diseño detallado de los componentes de un sistema desde etapas tempranas de su desarrollo hasta la evaluación de su desempeño a diferentes niveles de funcionamiento. Existen diferentes tipos de modelos de simulación: estáticos o dinámicos, determinísticos o estocásticos, continuos o discretos. La simulación puede definirse como el uso de modelos físicos o matemáticos como un vehículo para responder preguntas sobre un sistema específico [1, 2].

### 2.1 Tipos de simulación

La simulación puede ser de diferentes tipos [3, 4]:

- Simulación estática: Es la representación de un sistema en un instante de tiempo determinado.
- Simulación dinámica: Es la representación de un sistema cuando este evoluciona con el tiempo.

---

<sup>1</sup> [claudiah@unicauca.edu.co](mailto:claudiah@unicauca.edu.co)

<sup>2</sup> [vmirama@unicauca.edu.co](mailto:vmirama@unicauca.edu.co)

<sup>3</sup> [vsolarte@unicauca.edu.co](mailto:vsolarte@unicauca.edu.co)

- Simulación determinística: Un modelo de simulación se dice determinista si no contiene absolutamente ninguna variable aleatoria.
- Simulación aleatoria: Representa un sistema que contiene una o más variables aleatorias, sea el tiempo entre llegadas, el tamaño de los paquetes, el tiempo de comienzo de la simulación, entre otras.
- Simulación continua: Representa un sistema cuyo comportamiento cambia de forma continua con el tiempo. Para describir las interacciones entre los elementos del sistema se suele requerir de modelos matemáticos y ecuaciones diferenciales que describen la evolución del sistema de manera continua.
- Simulación discreta: Representa un sistema cuyo comportamiento cambia únicamente en instantes de tiempos concretos denominados eventos. Este tipo de simulación es útil para el análisis de sistemas secuenciales o que usen colas, los cuales son muy comunes en el ambiente de las comunicaciones

## 2.2 Herramientas de simulación

Existen una gran cantidad de herramientas de simulación, se presentan algunos de los criterios más importantes que permiten evaluar y comparar los simuladores, entre los cuales están [5-7]:

- Escalabilidad: impacto del incremento del número de nodos o del incremento de la carga en las métricas del desempeño del sistema.
- Velocidad de ejecución: tiempo que la simulación toma para completarse, es deseable una rápida ejecución, pero esta depende de la escalabilidad y la fiabilidad.
- Fidelidad: grado de detalle en el modelado de la simulación, que le permite aproximarse al sistema real, mayor fidelidad puede incrementar el tiempo de ejecución.
- Tipo: Indica el tipo de simulador.
- Licencia software: especifica el tipo de licencia del simulador, comercial o software libre.
- Sistema Operativo: se buscaría multiplataforma, el soporte para sistemas operativos libres GNU/Linux es importante.
- Tiempo: Un simulador puede ser continuo o de eventos discretos.
- Popularidad: Indica las medidas de consulta en sitios Web, y la publicación en diferentes artículos.
- Interfaz gráfica de usuario: se busca una interfaz gráfica de usuario amigable para la creación intuitiva de redes
- Soporte: Indica el nivel de actividad por parte de una comunidad de usuarios y desarrolladores que crean tutoriales, reportes de problemas, propuestas de mejora, foros.
- Lenguaje de programación: el tipo de lenguaje de programación sobre el cual está desarrollado.
- Flexibilidad: Tener la capacidad de integrarse con otras herramientas.
- Funcionalidad: hace referencia a las capacidades de la herramienta para modelar las diferentes tecnologías y protocolos, y al seguimiento que se puede hacer al comportamiento de la tecnología modelada en el proceso de simulación.
- Confiabilidad: verificar que la herramienta tenga el respaldo requerido para usarla como herramienta de análisis en procesos de simulación.
- Eficiencia: capacidad de la herramienta para proveer el rendimiento adecuado en relación a la complejidad del proceso de simulación.

## 2.3 Técnicas de simulación

Explican cómo realiza procesamiento el simulador, pueden ser paralelas, distribuidas o una combinación de las dos [8]. La simulación también puede ser clasificada en estocástica o de eventos discretos, la simulación estocástica es la simulación de procesos aleatorios, considerada como un experimento estadístico, en el cual los datos se analizan usando algunos métodos estadísticos. La simulación de eventos discretos es un modelo desarrollado para observar el tiempo basado en el comportamiento de un sistema. Simulación paralela es el proceso de sincronizar varias simulaciones ejecutándose en múltiples procesadores, esto toma muchos recursos como memoria y tiempo de procesamiento; la simulación de grandes redes requiere una gran cantidad de memoria y tiempo de procesamiento, por lo tanto, surge el concepto de simulación distribuida. Simulación distribuida: el proceso de simulación se distribuye entre varias estaciones de trabajo, sin embargo, esto requiere sincronización y mensajería entre las máquinas, por lo tanto, se incrementa el tiempo de procesamiento. Simulación paralela y distribuida: dado que las redes de telecomunicaciones implican una gran cantidad de procesos, se recomienda ejecutar múltiples procesos en múltiples máquinas, y considerar los tiempos de procesamiento asociados a la sincronización. Considerando que en el proceso de simulación se involucran diferentes métodos de modelado, teorías de modelado, lenguajes de modelado, y métodos de simulación.

### 3. MÉTODO

Se realizó una revisión de las diferentes metodologías de modelado y simulación existentes, también se analizaron los diferentes niveles de análisis en un sistema de comunicaciones, luego se escogieron las metodologías a emplearse para representar diferentes sistemas de telecomunicaciones.

#### 3.1 Metodologías de modelado y simulación

1. *Metodología en Cascada*. Introducido por Royce en 1970 [9], para el diseño de software de sistemas espaciales y es uno de las metodologías más populares para guiar la evolución de un producto o sistema. Este modelo no es muy flexible, pero representa las bases de otros modelos, se presenta en la Figura 1.

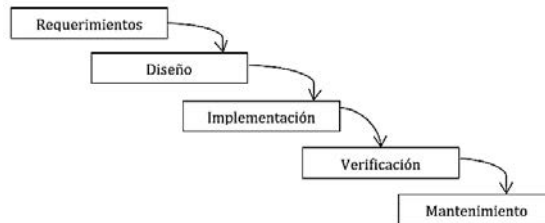


Figura 1. Metodología en cascada

- Ingeniería y Análisis del Sistema: el trabajo comienza estableciendo los requisitos de todos los elementos del sistema y luego asignando algún subconjunto de estos requisitos al software.
  - Análisis de los requisitos del software: el proceso de recopilación de requisitos se centra especialmente en el software. Se deben comprender el ámbito de la información del software, así como la función, el rendimiento y las interfaces requeridas.
  - Diseño: se enfoca en cuatro atributos: la estructura de los datos, la arquitectura del software, el detalle procedimental y la caracterización de la interfaz. Traduce los requisitos en una representación del software con la calidad requerida antes de realizar la codificación.
  - Codificación: el diseño debe traducirse en una forma legible para la máquina, un diseño detallado garantiza una suave transición hacia la codificación.
  - Prueba: cuando se ha generado el código, se realiza la prueba del programa, esta se centra en la lógica interna del software y en las funciones externas, realizando pruebas que aseguren que la entrada definida produce los resultados que realmente se requieren.
  - Mantenimiento: el software sufrirá cambios después de que se entrega al usuario, estos pueden ser debidos a errores, adaptaciones en el entorno de uso (sistema operativo o dispositivos periféricos) o a ampliaciones funcionales o del rendimiento solicitadas por el usuario.
2. *Metodología Incremental*. Esta es una evolución de la metodología en Cascada, esta es más flexible y permite un desarrollo más rápido, permite que se vayan desarrollando el sistema por partes, se siguen todos los pasos para realizar una fracción del sistema, en pequeños incrementos, al finalizar cada uno se tiene una interacción con el usuario [10]. El resultado de la interacción se tendrá en cuenta para el próximo incremento, se realizan incrementos hasta completar el sistema, como se aprecia en la Figura 2.

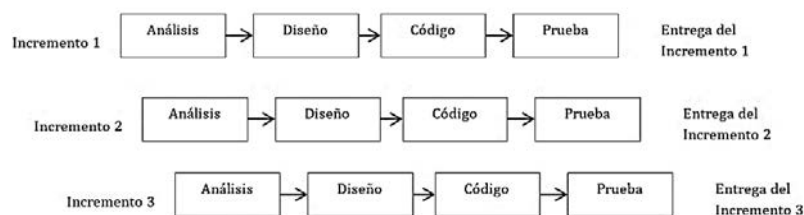


Figura 2. Metodología Incremental

3. *Metodología en V*. El modelo en V es una variación del modelo en cascada que muestra cómo se relacionan las actividades de prueba con el análisis y el diseño [12]. Como se muestra en la Figura 3, la codificación forma el vértice de la V, con el análisis y el diseño a la izquierda y las pruebas y el mantenimiento a la derecha.

  - El nivel 1 está orientado al "usuario". El inicio del proyecto y el fin del proyecto constituyen los dos extremos, se compone del análisis de requisitos y especificaciones, se traduce en un documento de requisitos y especificaciones.
  - El nivel 2 se dedica a las características funcionales del sistema, puede considerarse como una caja negra, y caracterizarla únicamente con aquellas funciones que son directa o indirectamente visibles por el usuario final, se traduce en un documento de análisis funcional.
  - El nivel 3 define los componentes hardware y software del sistema final, denominado arquitectura del sistema.
  - El nivel 4 es la fase de implementación, en la que se desarrollan los elementos unitarios o módulos del sistema.



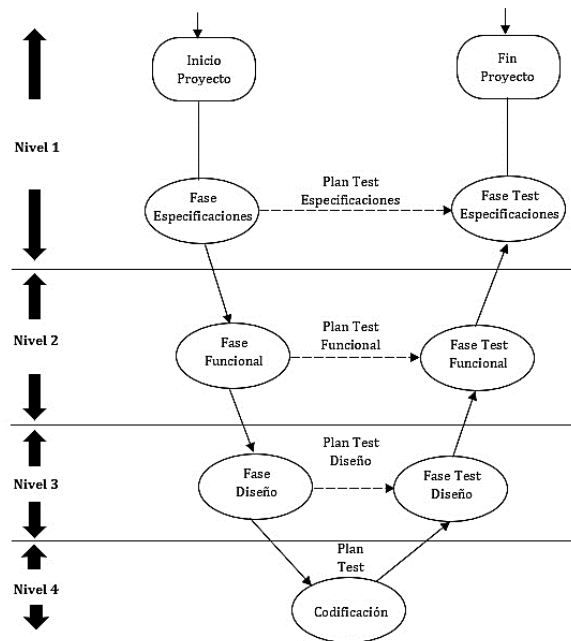


Figura 3. Metodología en V [12]

4. *Metodología de Prototipos.* Está basada en crear parte una versión inicial del sistema, llamado prototipo, el objetivo es construir el sistema mediante la implementación de varios prototipos hasta lograr el sistema final [13]. El énfasis está basado en la creación del prototipo, con menor atención a la documentación. También es importante la interacción con el usuario en la creación de cada prototipo, para realimentar el sistema. En la Figura 4 se presenta la metodología de prototipos, básicamente son los mismos pasos, pero permiten un desarrollo rápido del sistema y la revisión de las diferentes versiones del prototipo. Esta metodología es básicamente prueba y error ya que si al usuario no le gusta una parte del prototipo significa que la prueba fallo por lo cual se debe corregir el error, hasta que el usuario quede satisfecho. Además, el prototipo debe ser construido en poco tiempo, usando los programas adecuados y no se debe utilizar mucho dinero pues a partir de que este sea aprobado, se inicia el verdadero desarrollo del software.

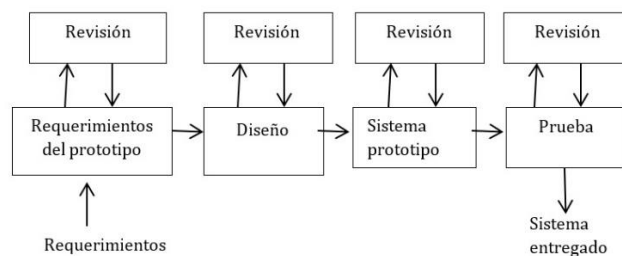


Figura 4. Metodología de prototipos

5. *Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones.* La metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones [14], define los lineamientos necesarios para el modelado de sistemas de telecomunicaciones, mediante una serie de pasos que permiten identificar, estructurar e implementar una simulación del sistema. Estos pueden adaptarse en tres pasos principales para el desarrollo de simulaciones, ilustrados en la Figura 5, estos pasos los cuales permiten abstraer la información necesaria para la construcción del modelo de simulación.

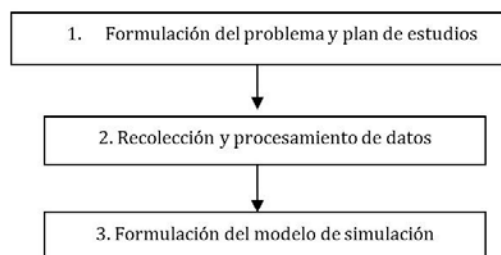
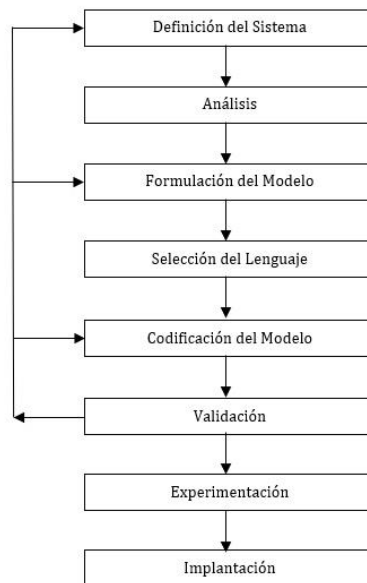


Figura 5. Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones

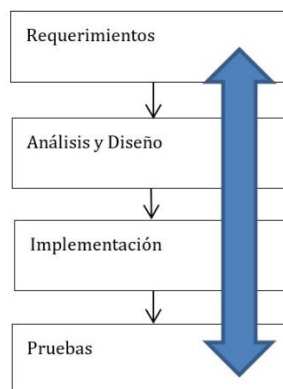
- Formulación del modelo: para la formulación del problema y del plan de estudios correspondiente, se debe definir el objetivo de la simulación, de tal manera que esta ofrezca los elementos necesarios para obtener los resultados deseados.

- Recolección y procesamiento de información: en esta etapa se recolecta la información relacionada al objeto de estudio, con el objetivo de identificar los módulos y parámetros necesarios para la elaboración de un modelo de simulación.
  - Modelo de simulación: después de la etapa de recolección y el procesamiento de los datos del sistema, se procede con el planteamiento de un modelo de simulación para el objeto de estudio, este debe combinar los objetos y estructuras descritas en la fase anterior.
6. *Metodología Iterativa*. La Metodología iterativa [5] usada para el desarrollo de simulaciones consta de ocho fases que son: Definición del Sistema, Análisis, Formulación del Modelo, Selección del Lenguaje, Codificación del Modelo, Validación, Experimentación e Implantación como se puede ver en la Figura 6. Esta metodología es progresiva pero permite entrar en un modo cíclico si los datos validados no son correctos, es posible volver en primera instancia a la fase de codificación del modelo, si el error persiste o no se puede solucionar en esta fase es necesario volver a la fase de formulación del modelo y revisar si el sistema ha sido modelado sin sobredimensionar sus características o limitándolas más de lo necesario, si el error o los resultados incoherentes son persistentes es necesario volver al inicio y revisar la definición del sistema.



**Figura 6.** Metodología Iterativa

7. *Metodología Adoptada del Proceso Unificado Racional*. La metodología adoptada del Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*), RUP tiene como ventaja la retroalimentación entre las etapas que plantea, lo que permite que una vez terminado el producto se regrese a la etapa inicial y se verifique si necesita alguna adición o se encuentra terminado. En la Figura 7 se muestran las etapas de desarrollo que se contemplan.

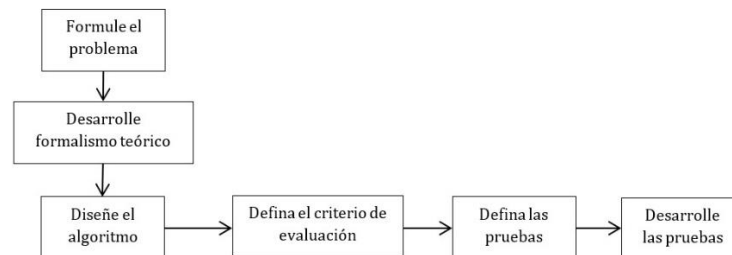


**Figura 7.** Metodología RUP

Para la elaboración de los casos de uso del sistema primero se realiza un análisis de requerimientos, estos pueden ser funcionales o no funcionales y permiten enumerar las diferentes características del sistema.

*Metodologías para comunicaciones M2M*. La Figura 8 presenta la metodología definida para comunicaciones Máquina a máquina (M2M, *Machine to machine*) [15]. Primero se formula el problema que requiere una solución de tipo discreto, se deben considerar las limitaciones de las comunicaciones M2M, como batería, tamaño, empleo de receptores SDR exclusivamente, se debe explicar el problema y explicar porque la solución continua no es suficiente.

- Desarrollar el formalismo teórico: se analiza la literatura, buscando una solución al problema, este se puede adaptar o construir una solución sino existe.
- Diseñar el algoritmo: diseñar el algoritmo
- Definir el criterio de evaluación para las pruebas: se deben tener resultados con los cuales realizar la validación.
- Definir las pruebas: especificar el tipo de pruebas, hardware, la ubicación, el software requerido, la interacción entre los componentes.
- Desarrollar las pruebas: determinar si se cumplen con los supuestos del formalismo, y cómo se resuelve el problema planteado inicialmente.



**Figura 8.** Metodología para comunicaciones M2M

8. *Metodología basada en Ülgen.* Algunas veces se emplea la metodología llamada “Metodología de simulación- Perspectiva de un profesional” referido en [5]; la cual se compone de las siguientes fases:

- Fase 1: Definición del problema.
- Fase 2: Diseño del estudio.
- Fase 3: Diseño del modelo conceptual.
- Fase 4: Formulación de variables y definición de procesos.
- Fase 5: Construcción y validación del modelo.
- Fase 6: Experimentación con el modelo.
- Fase 7: Documentación y presentación de resultados.

Las actividades que se plantea en cada fase son muy similares a las metodologías anteriormente descritas, estas serán presentadas<sup>4</sup> más adelante cuanto se analicen los ejemplos de aplicación a sistemas de telecomunicaciones.

9. *Metodología basada en Ülgen y Wojcik.* Es una metodología basada en la adaptación de los pasos de las metodologías de dos autores para simulación de eventos discretos [7] [8], está basada específicamente en la definición del sistema a simular. Contempla los siguientes pasos:

- Definición del problema.
- Definición de los escenarios y casos de simulación.
- Definición de las características de los escenarios y casos de simulación.
- Ejecución de las pruebas de simulación
- Análisis de resultados.

### 3.2 Sistemas de Telecomunicaciones

Los sistemas de telecomunicaciones que se consideran para las metodologías de modelado y simulación son:

- Sistemas de comunicaciones móviles
- Sistemas de comunicaciones inalámbricos
- Sistemas de comunicaciones por fibra óptica
- Sistemas de comunicaciones cableados

Además, un sistema de comunicaciones puede analizarse a diferentes niveles que pueden ser a nivel de enlace o a nivel de sistema, entre ellos están:

- A Nivel físico: permiten caracterizar un medio de transmisión, y el desempeño del sistema en función del nivel uno, los parámetros característicos son: BER, PER, and error-vector magnitude (EVM).
- A nivel de enlace: caracterizan aspectos de nivel dos de la capa OSI.
- A nivel de red: permiten analizar aspectos de nivel tres de la capa OSI.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Después de realizar el análisis de diferentes metodologías de modelado y simulación para sistemas de telecomunicaciones, se formulan las siguientes consideraciones:

- La mayoría de metodologías son adaptaciones de procesos de ingeniería del software, por lo tanto, no son completamente adecuadas para representar sistemas de telecomunicaciones.

- Cuando se realiza el planteamiento del problema, no se tiene un cliente real, como sucede en ingeniería del software, sino que el problema corresponde generalmente a algún aspecto de la red de comunicaciones que debe representarse, por lo tanto, los requerimientos que surgen son generalmente no funcionales, y no están orientados a satisfacer una necesidad de un usuario.
- En los problemas que generalmente se representan, pocas veces se tiene oportunidad de realizar mediciones en el sistema real, dado el alto costo de los mismos, y el uso de la simulación como una herramienta que permite el acercamiento a dichas tecnologías. Por lo tanto, no hay forma de validar contra resultados reales.
- Independiente del tipo sistema de comunicaciones que se analice, la metodología no cambia, dado que se deben realizar los mismos análisis y seguir los mismos pasos, lo que puede cambiar depende de los niveles de análisis y de la selección de la herramienta de simulación.

Para la definición de la metodología se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Que permita realizar un desarrollo simple del sistema, y permita realizar cambios en la medida de avance de los proyectos.
- Un desarrollo rápido, que brinde documentación de los procesos, pero que ese proceso no sea dispendioso.
- Definir un plan de pruebas para el sistema y permitir cambios en este.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, las metodologías que se consideran para analizar un sistema de comunicaciones son las siguientes:

- Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones
- Metodología Unificada Racional
- Metodología Iterativa
- Metodología basada en Ülgen
- Metodología basada en Ülgen y Wojcik

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías de modelado y simulación escogidas a los sistemas de telecomunicaciones citados a continuación.

- Nivel físico de la tecnología LTE para el enlace de subida del canal PUSCH.
- Nivel físico del Enlace de Bajada de LTE.
- Red de telecomunicaciones basada en el estándar IEEE 802.15.4 con topología en malla que soporte el tráfico generado por PLC.
- Sistema de comunicaciones limitado por interferencia de única portadora
- Mecanismo de acceso al medio a redes VANET.

#### **4.1 Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones**

La metodología es extensa en la parte de definición de elementos, estructuras, datos, los pasos iniciales de formulación del modelo y plan de estudios, y recolección y procesamiento de información, conllevan gran cantidad de tiempo, enfocado en la definición y documentación, sin embargo la última etapa solo llega hasta el modelo del sistema y determina las actividades siguientes, como son la simulación, análisis de datos y realimentación a las partes iniciales en caso de ser necesario una modificación, basada en los resultados finales.

La etapa de recolección y procesamiento de información, se debe hacer una definición muy amplia de los diferentes elementos, esto conlleva muchas veces a largos periodos de tiempo y confusión en medio de tantos elementos. Es preocupante que al final no haya un proceso que revise si lo que se planteó funciono correctamente, porque sería necesario realizar cambios en todo el proceso realizado inicialmente. Cuando se trabaja en los diferentes niveles de red: físico, enlace o red, la complejidad es comparable, dado que cada nivel tiene en cuenta diferentes tipos de variable que deben ser analizados. Esta metodología no se considera conveniente, dada la gran cantidad de documentación que requiere, la falta de mecanismos de realimentación, y la falta de definición de procesos de experimentación.

#### **4.2 Metodología Unificada Racional**

Es una metodología que permite realizar acompañamiento en todo el proceso de desarrollo de una simulación, hasta la parte de pruebas, también permite realizar realimentación de las etapas de acuerdo a los resultados que se obtienen.

El proceso de análisis y diseño es más simple que la metodología anterior, básicamente se definen los elementos principales a tener en cuenta en el sistema, y los aspectos específicos se dejan para la etapa posterior de implementación, la cual es adaptable a cualquier lenguaje de simulación, permite realizar la definición de las pruebas que se realizarán a la simulación, y los resultados esperados de la misma. Esta metodología no tiene un proceso de documentación tan extenso como la anterior y permite llegar a un sistema en forma más rápida. La metodología es igual de aplicable cuando se trabaja en los diferentes niveles de red: físico, enlace o red.

### 4.3 Metodología Iterativa

Es una metodología que define una serie de pasos, los cuales incrementan la cantidad de actividades a desarrollar, sin embargo, acompaña en todo el proceso de simulación. Tiene la posibilidad de realimentar de acuerdo a los resultados de cada una de las fases, y realizar cambios en todas las etapas del sistema. Las fases de definición del sistema, análisis y definición del modelo permiten realizar una abstracción del sistema para posteriormente asegurar el éxito de las siguientes etapas.

La fase 4 de selección del lenguaje, no es muy adecuada, dado que realmente no se selecciona un lenguaje, sino que la mayoría de veces se escoge una o varias herramientas de simulación. La etapa de codificación del modelo no siempre se adapta a todas las situaciones, dado que, según la herramienta de simulación y el nivel de análisis, no siempre se codifica, algunas veces se configura o se realizan diferentes actividades según las prestaciones del simulador. La etapa de validación no siempre puede llevarse a cabo dado que no en todos los sistemas de comunicaciones se tienen resultados o elementos que permitan realizar la comparación de los resultados, además la palabra validación implica una serie de procesos de mayor complejidad a una simple comparación de resultados.

Las fases de Implantación y Monitoreo y control, no son adecuadas para simulación de sistemas de telecomunicaciones. La implantación hace referencia a la puesta en funcionamiento de un sistema con su mejor configuración, de acuerdo a la etapa de experimentación, y para simulación, el sistema después no queda funcionando por lo tanto no es adecuado considerar esta fase. El Monitoreo y Control es aquel que se realiza un tiempo después de que un sistema esté funcionando, para revisar su estado, sin embargo, en simulación, un sistema no estará en operación.

### 4.4 Metodología basada en Ülgen

Esta metodología es bastante completa, define una serie organizada de pasos para realizar la simulación de un sistema de telecomunicaciones. Las etapas iniciales son comunes con las demás metodologías, sin embargo, en la etapa de Formulación de Entradas, Suposiciones, y Definición de Procesos, es un poco compleja, dado que no siempre se conoce exactamente cuáles serán las suposiciones a considerar para el sistema bajo análisis. Esta etapa implica una gran demanda de tiempo y documentación en el proceso.

La etapa de validación también tiene un alto grado de trabajo, dado que como se dijo antes la validación es una etapa que implica diferentes conceptos, de acuerdo al sistema bajo análisis. La etapa final de documentación, realmente es un proceso que se debe realizar a lo largo de toda la metodología. La metodología puede emplearse para sistemas de telecomunicaciones en los diferentes niveles de red: físico, enlace o red.

### 4.5 Metodología basada en Ülgen y Wojcik

Esta constituye una adaptación, por lo tanto, se han omitido diferentes pasos de las metodologías originales, tratando de hacer más simple el proceso de desarrollo de la simulación, sin embargo, al no tener una etapa de análisis y diseño, muchos aspectos se quedan cortos y deben ser desarrollados por fuera de la metodología. Esta adaptación pareciera adecuada para realizar las pruebas de un sistema de telecomunicaciones previamente analizado y diseñado, dado que dentro de las etapas no se consideran estas actividades. En la Tabla 1 se presenta una comparación entre las diferentes metodologías analizadas, basado en su aplicación a un problema real.

**Tabla 1.** Comparación metodologías empleadas

	<b>Documentación</b>	<b>Proceso completo</b>	<b>Realimentación</b>	<b>Tiempo del desarrollo</b>	<b>Niveles</b>
Metodología 4.1	Extensa	No, falta experimentación	No	Medio	Todos
Metodología 4.2	Media	Sí	Sí	Medio	Todos
Metodología 4.3	Media	Hay etapas que no tiene sentido	Si	Medio	Todos
Metodología 4.4	Extensa	Hay muchas etapas	No	Largo	Todos
Metodología 4.5	Escasa	Es muy corto, faltan etapas iniciales	No	Corto	Todos

## 5. CONCLUSIONES

La mayoría de metodologías para representar sistemas de telecomunicaciones corresponden a adaptaciones de procesos de ingeniería del software, esto implica en cada una de ellas una serie de pasos que no deben ser considerados cuando se representan sistemas de telecomunicaciones.

Para representar un sistema de telecomunicaciones, se debería brindar una metodología ágil, que permita el modelado simple del sistema, sin detenerse un tiempo considerable en la documentación del mismo.

La metodología que se considera más adecuada para analizar un sistema de comunicaciones es la Metodología Unificada Racional ya que permite analizar el proceso completo, realiza una documentación suficiente, permite realimentaciones en las etapas de simulación y el tiempo de desarrollo es medio. En cambio, la que no se recomienda emplear es la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones, dado que tiene un largo proceso de documentación que generalmente confunde a los desarrolladores y no aporta en definitiva al objetivo de la simulación. La metodología iterativa debe analizarse omitiendo algunos pasos, dado que para una simulación no todos los pasos que define tienen sentido.

Las demás metodologías de simulación pueden emplearse de acuerdo a las necesidades, si se desea una simulación que permita analizar un sistema en forma aproximada y no tan detallado, podría ser adecuada la Metodología basada en Ülgen y Wojcik.

Basados en los resultados de este proyecto, se espera a futuro formular una metodología de simulación adecuada para diferentes niveles de un sistema de comunicaciones.

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad del Cauca, por el acompañamiento, orientación y soporte brindados durante el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Page, E. (1994). Simulation Modeling Methodology: Principles and Simulation Modeling Methodology: Principles and principles and etiology of decision support. Doctor dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [2] Nejat, A. (2002). Modeling and Simulation Environment for Satellite and Terrestrial Communications Networks. In European COST Telecommunications Symposium.
- [3] Universidad Politécnica de Cataluña (2004). OPNET: Manual de Usuario. Departamento de Ingeniería Telemática.
- [4] Nayak, A., Rai, C. & Mall, R. (2016). Computer Network Simulation Using NS2. Taylor & Francis.
- [5] Wojcik, V. (2003). Steps in Simulation and Model Building. Simulation Methodology – Discrete Event Simulation. Brock Computer Science.
- [6] Nayyar, A. & Singh, R. (2015). A Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs). Journal of Wireless Networking and Communications 5(1), 19-47.
- [7] Sundani, H. (2011). Wireless Sensor Network Simulators: A Survey and Comparisons. International Journal of Computer Networks 2(5), 249-265.
- [8] Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology (2011). Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT).
- [9] Royce, R. (2016). Managing the development of large software systems. In 9th International Conference on Software Engineering.
- [10] Naveen (2017). [What is Incremental Model in software testing and what are advantages and disadvantages of Incremental Model](#). Online [Feb 2018].
- [11] Munassar, N. & Govardhan, A. (2010). Comparison between five models of software engineering. International Journal of Computer Science Issues 7(5), 94-101.
- [12] Rodriguez, J. (2008). [Metodología de desarrollo de software. El Modelo V o de Cuatro Niveles](#). Online [Feb 2018].
- [13] Carr, M. & Verner, J. (1997). Prototyping and software development approaches. University of Hong Kong. Department of Information Systems.
- [14] Universidad del Cauca (1995). Metodología de Simulación de Equipos de Telecomunicaciones. Trabajo de grado.
- [15] Suci, M. (2017). Discrete transmit power devices in dense wireless networks: methodology and case study 5(1), 1762 – 1778.

# Sistemas de alertas tempranas en Colombia orientadas a la reducción del riesgo ante crecientes y crecientes súbitas: Diagnóstico y propuesta de intervención bajo Internet de las Cosas(IoT)

Ernesto Neira<sup>1</sup>  
Robinson Castillo<sup>2</sup>  
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Bogotá – Colombia

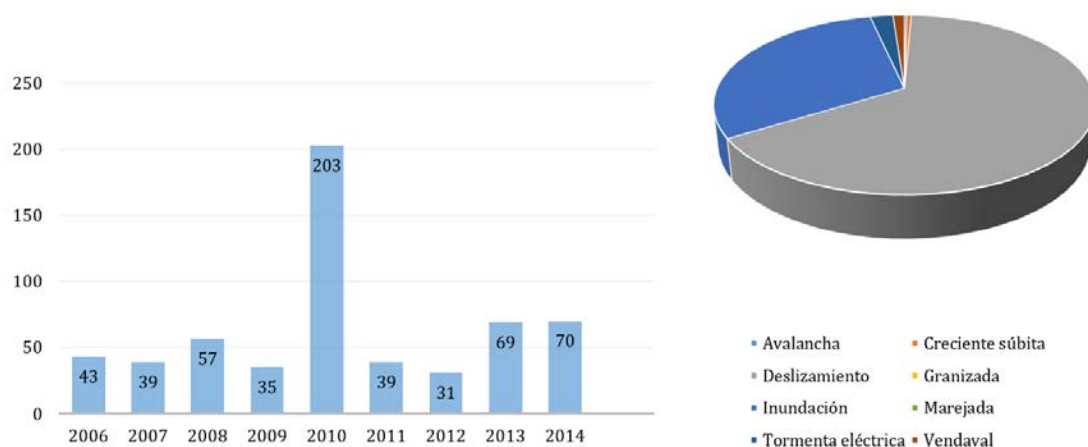
El presente estudio tiene por tema principal los sistemas de alertas tempranas para mitigación del riesgo ante inundaciones y crecientes súbitas. Además, este documento se divide en dos temáticas centrales: la primera, se presentan los sistemas de alertas tempranas que son usados actualmente en Colombia. en especial, el mecanismo para emisión de alertas que es aplicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. De esta primera temática, se logran identificar los principales errores del sistema, determinando las causas que llevan a que el modelo actual no sea efectivo para la mitigación del riesgo ante avenidas excepcionales. En la segunda parte, se aborda el diseño de un sistema de alertas tempranas orientado a las características demográficas y económicas, típicas, de las poblaciones colombianas en riesgo. Finalmente, se presenta la propuesta del uso de tecnologías de internet de las cosas para el establecimiento de Sistemas de Alertas Tempranas orientados a la mitigación del riesgo ante crecientes súbitas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un desastre natural es definido como un evento que ocasiona pérdidas materiales o humanas, y cuyo origen directo, no es el hombre [1]. Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP), entre el año 2006 y 2014 en Colombia se vieron afectados alrededor de 12.3 millones de personas debido a desastres naturales. De las cuales 9 millones fueron originadas debido a inundaciones. Mientras que el número de muertes llegó a los 3.181. En el caso del departamento de Antioquia, que fue el departamento con mayor número de decesos causados por fenómenos naturales durante este periodo, presentándose un total de 586 muertes, de las cuales 432 obedecieron a causas hidro-meteorológicas. Los desastres de origen hidro-meteorológico pueden ser divididos en los siguientes tipos:

- **Avalancha (alud):** Masa de nieve o de otro material que se precipita desde una cierta altura o sobre otra cosa de manera violenta.
- **Creciente súbita (avenida, crecida, avenida excepcional):** Es la elevación del nivel de una cuenca de agua significativamente mayor que el flujo medio de este.
- **Deslizamiento:** Corrimiento o movimiento de masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud.
- **Granizada:** Precipitación sólida que se compone de bolas o grumos irregulares de hielo.
- **Inundación:** Ocupación del agua de zonas que típicamente permanecen secas.
- **Marejada:** Movimiento agitado del mar.
- **Tormenta eléctrica:** Fenómeno meteorológico caracterizado por la aparición de descargas eléctricas.
- **Vendaval:** Vientos fuertes.

En la Figura 1 se presenta la relación de muertes en el departamento de Antioquia por año y su relación con el tipo de evento.



**Figura 1.** Muertes causadas por desastres de origen hidro-meteorológico en el departamento de Antioquia, en el periodo comprendido entre el año 2006 y 2014, y su relación con el tipo de evento

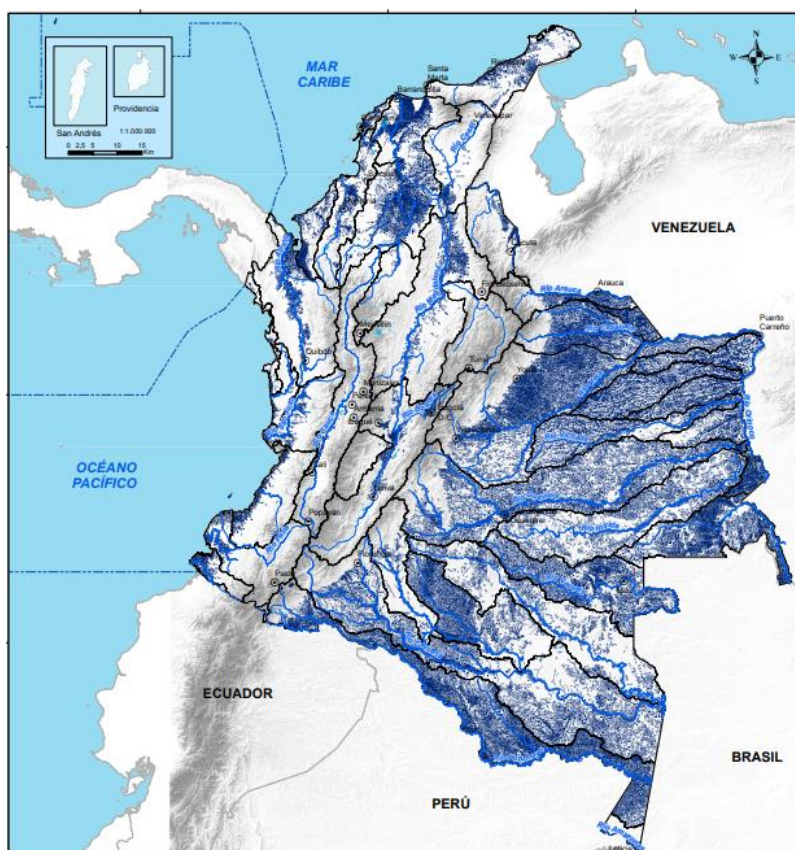
<sup>1</sup> [erneira@sena.edu.co](mailto:erneira@sena.edu.co)

<sup>2</sup> [rcastillo48@misena.edu.co](mailto:rcastillo48@misena.edu.co)



Desastres recientes como el ocurrido en Mocoa (capital del departamento de Putumayo, Colombia) el primero de abril de 2017, cuyas causas son presentadas en la referencia [2], son un testimonio del riesgo que corren algunas comunidades riverseñas en Colombia. A esto se suman, situaciones como las ocurridas en Girardot (Cundinamarca) el 16 de marzo de 2018, en la cual una creciente súbita, debido a las aguas lluvias, y el colapso de la red de acueducto, produjo la muerte de una persona.

El 16 de mayo de 2018, debido a la alta probabilidad de inundaciones, se encontraban emitidas un total de 4 alertas rojas y 5 alertas naranjas en todo Colombia. Mientras para posibles crecientes súbitas el número de alertas rojas fueron 13, naranjas de 18 y amarillas 11. De hecho, el panorama de fenómenos hidro-meteorológicos muestra que, al 16 de mayo de 2018, la mayoría de los departamentos en Colombia presentaban algún tipo de alerta. En la Figura 2 se presenta el mapa de amenazas de inundación para un periodo de retorno de 20 años, el cual es generado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).



**Figura 2.** Mapa de amenazas de inundaciones emitida por el IDEAM

En general, en la mayoría de los departamentos de Colombia, los eventos de inundaciones son la principal causa de desastres (a excepción de los departamentos de la Región Andina donde la principal causa son los deslizamientos, pasando las inundaciones a segundo lugar) [3]. Esto nos lleva a pensar, que los esfuerzos que se han estructurado desde la tragedia de Armero (Tolima), y que llevó a la creación del Sistema Nacional para la Atención y Prevención de Desastres (SNPAD) [4, 5], aun son débiles para enfrentar y mitigar los desastres ocasionados por causas naturales en Colombia.

Este trabajo pretende estudiar el funcionamiento del sistema colombiano para la mitigación del riesgo, enfocado en el análisis de las inundaciones, crecientes y crecientes súbitas. Proponiendo una solución tecnológica que se oriente a las características típicas de la población colombiana y que propenda por la reducción de muertes causadas por los fenómenos hidro-meteorológicos y en especial, crecientes súbitas.

El presente documento se estructura de la siguiente manera: En la Sección 2, se presenta el funcionamiento del sistema colombiano para la mitigación del riesgo. La Sección 3, presenta la identificación de los problemas que presenta el sistema actual. En la Sección 4, se realiza el levantamiento de requerimientos para el diseño de un Sistema de Alertas Tempranas (SAT) de carácter comunitario, el cual estará destinado a mitigar el riesgo ante inundaciones y crecientes súbitas. En la sección 5, se presentará el diseño de la solución identificada. Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sección 6.

## **2. SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANAS EN COLOMBIA**

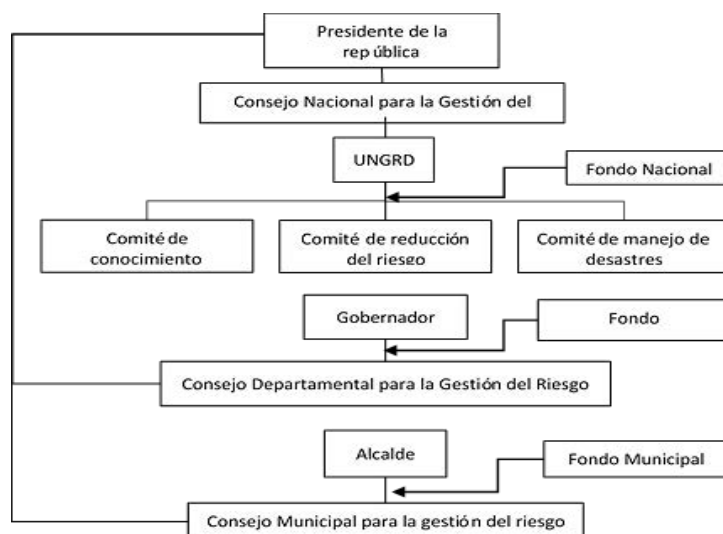
La estructura del (SNPAD) es mostrada en la figura 3. El sistema se encuentra en cabeza del presidente de la república. En segunda instancia está el consejo Nacional para la Gestión del Riesgo que es la entidad encargada de orientar todo

el sistema. Estando integrada por los ministros, el DNP y el director de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). En el tercer nivel esta los comités de Conocimiento, Reducción del Riesgo y de manejo de desastres.

El comité de conocimiento está encargado del manejo de información del riesgo. En este comité intervienen los directores del Departamento Nacional de Planeación, Departamento Nacional de Estadística (DANE), Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto Colombiano de Geología y Minería, el IDEAM, la Dirección General Marítima, la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales, la Federación Nacional de Departamentos y la Federación Colombiana de Municipios.

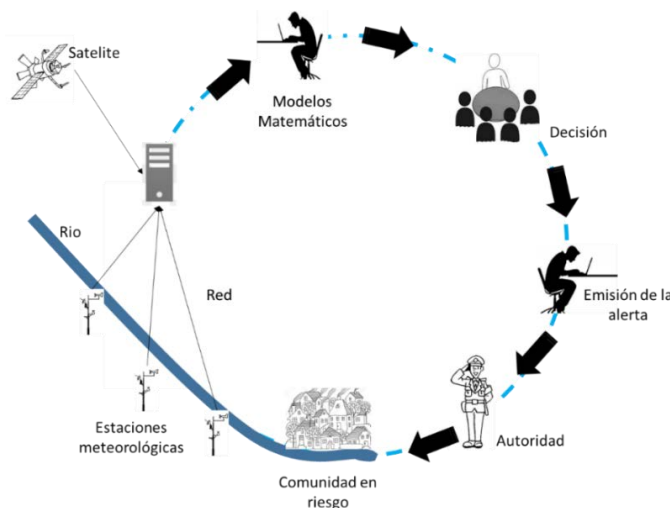
El comité de reducción de riesgo es la entidad encargada de implementar soluciones y está formada por los directores del Departamento Nacional de Planeación, el Consejo Colombiano de Seguridad, la Asociación de Corporaciones Autónomas, el presidente de la Federación Colombiana de Municipios, la Federación de Aseguradores Colombianos y los representantes de universidades públicas y privadas.

El comité de manejo de desastres está formado por director del Departamento Nacional de Planeación y los comandantes o directores del Ejército Nacional, la Armada Nacional, la Fuerza Aérea Colombiana, la Policía Nacional, la Defensa Civil, la Cruz Roja Colombiana y la Junta Nacional de Bomberos. Por último, Los consejos departamentales y municipales son los encargados de coordinar, asesorar y planear los procesos de gestión del riesgo. La estructura y su funcionamiento puede ser consultado en [6].



**Figura 3.** Estructura del Sistema Nacional del Riesgo de Desastres

En el caso de la emisión de pronósticos hidrológicos, esta responsabilidad pertenece al IDEAM. Entidad que cuenta, a la fecha, con 4504 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país. Estas estaciones recogen información y la comunican a servidores; en una etapa posterior, esta información, sumada a la información de satélites de carácter meteorológico, permite establecer un pronóstico basado en la experiencia, asociaciones, intuiciones y/o en el uso de modelos matemáticos (como los presentados por H. Rivera [7]). Posterior a esto, se toma la decisión de emitir o no, un aviso, boletín o alerta [8]. El funcionamiento es esquematizado en la Figura 4.



**Figura 4.** Esquema del funcionamiento de la emisión de pronósticos hídricos ante situaciones de inundaciones y avenidas excepcionales

Además de la red y sistema liderado por el IDEAM, algunos proyectos locales de SAT han sido desplegados por toda Colombia. Algunos de ellos son:

- SAT de Bogotá.
- Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA).
- Sistema de alerta temprana para la cuenca del río Combeima [9].
- Cuenca Media del Río Otún [10].
- Ríos Consota y san Eugenio [11].

El número de proyectos locales han venido en aumento durante los últimos años; con tecnologías y principios de funcionamiento diversos. De estas experiencias se puede recoger importante información para desarrollar un sistema óptimo que pueda mitigar el riesgo en las comunidades.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS PARA INUNDACIONES Y CRECIENTES SÚBITAS

Se debe mencionar que tanto las inundaciones, como las crecientes súbitas, tienen una relación directa con las precipitaciones [12]. En el caso de las inundaciones, estas ocurren de manera relativamente lenta, en comparación con una avenida excepcional. Aun así, las variabilidades en los fenómenos atmosféricos hacen que los modelos de predicción presenten una alta incertidumbre [13], generando predicciones, en muchos casos, erróneas. El campo del modelado está abierto y requiere del esfuerzo de la comunidad científica. Una buena clasificación y guía de modelos existentes puede ser consultada en [14].

Por un lado, las crecientes súbitas son fenómenos que suceden de manera repentina, muy difíciles de predecir y, requieren tiempos de respuestas extremadamente cortos (del orden de minutos). Es así, que el esquema de funcionamiento de la emisión de pronósticos hídricos ante situaciones de inundaciones y avenidas excepcionales del SNPAD es insuficiente (ver figura 4). Ya que, en este esquema, la alerta tarda en llegar a la comunidad en riesgo. Cada situación, cada río, cada comunidad, se encuentra ante características únicas. Esto hace que la cantidad de precipitaciones que pueden generar un desastre para una comunidad no sean iguales para otras, aun encontrándose sobre la misma cuenta hídrica.

Una propuesta de solución a este problema es el retiro del componente humano en la decisión; es decir, que la información sea enviada de manera directa a la población en riesgo. Siendo esto, un reto a nivel tecnológico, científico y de organización. El mayor reto a nivel tecnológico es la generación de la solución funcional que pueda ser desplegada, pagada y mantenida por las comunidades, llegando a ser entendida por cualquier miembro en la comunidad. El reto científico, es generar los modelos adaptativos que puedan generar las alertas para las condiciones dadas de cada comunidad, y que dicha solución pueda correr in situ de manera automatizada. En el tema organizacional, el SAT desplegado debe ser apropiado por la comunidad, quien tiene que velar por su buen funcionamiento. Figura 5 presenta el esquema de solución propuesta para mitigar el riesgo ante crecientes súbitas.

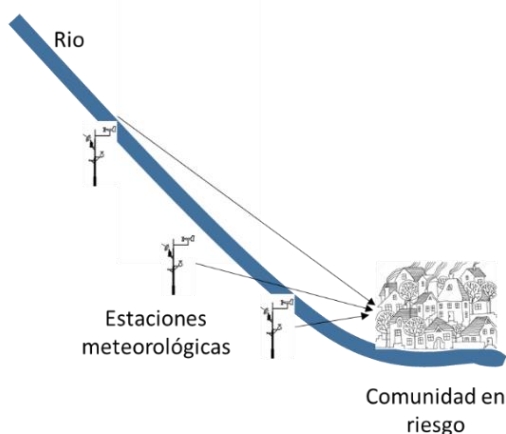


Figura 5. Esquema de la solución propuesta

Tomando en cuenta esta idea, el Centro de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones (CEET) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), se encuentra desarrollando un prototipo de SAT que funcione bajo este principio y el cual se espera sea puesto en servicio en el año 2019.

### 4. LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS

Como se muestra en la Figura 5, la idea fundamental del sistema propuesto es que las alertas sean emitidas directamente hacia la comunidad en riesgo. A pesar que la idea básica está clara, el sistema debe ser capaz de cumplir con requerimientos de los interesados. Para lograr esto, se abordó el problema técnico a través de una adaptación del estándar ANSI/EIA 632, Guía de Desarrollo de Sistemas [15].

#### 4.1 Identificación de interesados

El primer paso consiste en definir los posibles interesados en el SAT, su interés y una ponderación de la importancia para el producto, lo cual se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Interesados en el SAT

	Interesado	Interés	Nivel de Importancia
1	Comunidades en Riesgo.	Es el usuario final. Reducción del riesgo. Tranquilidad.	10
2	Alcaldía.	Mejorar indicadores de riesgo.	5
3	Gobernación.	Mejorar indicadores de riesgo.	5
4	IDEAM.	Información.	5
5	UNGRD.	Gestión del riesgo.	9
6	Comunidad Científica.	Información. Realización de pruebas.	9
7	Entidades estatales de normatividad.	Cumplimiento de la normatividad colombiana.	10
8	Empresas con intereses específicos.	Información. Aplicaciones específicas de los SAT.	6
9	Instaladores.	Económico.	9
10	Mantenimiento y reparación (operadores).	Económico.	9
11	Equipo de implementación.	Experiencia. Económico.	10
12	Empresas ensambladoras.	Económico.	8
13	Usuarios intermedios.	Económico.	7
14	Proveedores de tecnologías.	Económico.	9
15	Distribuidores de la tecnología.	Económico.	8
16	Normatividad.	Correcto funcionamiento y seguridad.	10

En la propuesta, el SAT está orientado a la comunidad en riesgo; por lo tanto, el nivel de importancia de este interesado es 10. Aunque muchos de los sistemas terminarán siendo financiados por el gobierno a través de las alcaldías y gobernaciones, el nivel de importancia de estas instituciones en la definición de los requerimientos, es muy baja. Mientras tanto, el IDEAM cuenta con su propia red y aunque los sistemas podrían llegar a enviar datos a sus servidores, esta función no es de vital importancia.

En el caso de la UNGRD, el SAT debe aplicar las recomendaciones de esta entidad, las cuales pueden ser consultadas en [16], por tanto, su nivel de importancia es alto. La comunidad científica podrá necesitar que el sistema aporte información con fines diversos, así como la integración de dispositivos futuros con fines científicos y/o académicos.

El SAT debe cumplir la normatividad colombiana, en especial a nivel ambiental y técnica. Por tanto, para las entidades estatales de normatividad presentan una gran importancia. Existen entidades que regulan los aspectos de interés en el SAT como son la Comisión de regulación de telecomunicaciones (CRC), que definen el uso espectral para sistemas de comunicaciones. Algunas empresas pueden requerir este tipo de información para ejercer su actividad económica, como son aquellas que usen el recurso hídrico para su ejercicio, empresas de turismo, deportes extremos y agricultura.

Para la creación y desarrollo de este proyecto se hace necesario contar con la participación de instaladores, personal de mantenimiento y reparación, que son aquellas personas que manipulan el SAT con fines a un buen funcionamiento. Además, se requiere la colaboración de las empresas ensambladoras que se encargarán de construir el sistema, colocándolo al alcance de las comunidades. Las empresas intermediarias participarán en el proceso de fabricación de alguna manera, e. g. empresas que fabriquen PCB. Los proveedores y distribuidores de tecnologías nos facilitarán los componentes necesarios para el SAT. Por último, las empresas o instituciones que se encargan de realizar la normatividad nos aseguran un correcto funcionamiento de los dispositivos. e. g. la normatividad en compatibilidad electromagnética o en seguridad eléctrica.

#### 4.2 Requerimientos funcionales, de desempeño y técnicos

Bajo la metodología empleada, a continuación, se describe el sistema mediante requisitos o requerimientos de tipo funcional, considerando que cada condición establecida cumple o está contemplada como necesaria para realizar algún tipo de función en el sistema y, ésta a su vez, posee un nivel o rango de desempeño y puede ser atendido mediante una o varias tecnologías que se definen posteriormente en la fase de diseño. En la Tabla 2 se resumen los requerimientos funcionales definidos para el SAT.

La tecnología o tecnologías que logrará cumplir con los requerimientos funcionales y de desempeño anteriormente establecidos, se identifica(n) y selecciona(n) durante la fase de diseño, siguiente de acuerdo a la metodología adoptada.

**Tabla 2.** Requerimientos funcionales y de desempeño mínimos en el SAT

Código	Función	Desempeño	Descripción requerimiento
RF001	Comunicar	Alcance mayor a 10 Kms Frecuencia de uso libre	El sistema de comunicación del SAT debe ser de tecnología inalámbrica, con un radio de alcance superior a 10 Kms en línea de vista y que opere en un rango de frecuencias de uso libre.
RF002	Comunicar	La comunicación debe estar siempre disponible	El sistema de comunicaciones debe tener una estructura redundante para garantizar su operación.
RF003	Comunicar	Gateway con por lo menos un canal dedicado exclusivamente al SAT	La estación de medición debe estar en permanente comunicación con el Gateway y enviarle información periódicamente.
RF004	Sensar	Nivel de líquido con nivel de activación 20mm	El sistema debe contar con un sensor de nivel de líquido tipo interruptor flotante simple, construido con material aislante.
RF005	Medir	Nivel y/o distancia Alcance de al menos 3 m No contactos ni partes mecánicas	El sistema debe tener un sensor que pueda ubicarse por fuera del cauce, para evitar contacto con el líquido, y que pueda medir distancia con un alcance igual o superior a 3 m.
RF006	Medir	Cantidad de lluvia o precipitación Por lo menos cada 0.3mm de lluvia debe generarse conteo	El sistema debe contar con un medidor de lluvia o precipitación que registre su medición por lo menos cada 0.3mm de lluvia.
RF007	Energizar	12 V DC – 100 W Energía alternativa	El sistema debe funcionar con energía alternativa, por lo menos a 12 V DC y con una potencia mínima de 100 W.
RF008	Energizar	Respaldo de energía 12 V DC	El sistema debe contar con sistema de batería recargable a modo de respaldo para el subsistema de alimentación principal de 12 V DC – 100 W.
RF009	Energizar	No red eléctrica local	La alimentación eléctrica del sistema debe ser independiente de la red local de energía eléctrica de donde sea ubicado.
RF010	Consumo	Consumo inferior a 500 mA sin transmisión	El sistema debe tener un consumo de energía inferior a 500 mA, cuando no se detecte algún cambio en la información a transmitir y ésta sea transmitida.
RF011	Modularidad	Tarjetas y/o sensores de cambio	El sistema debe permitir su reparación y el cambio de sus sensores o tarjetas que lo conforman.
RF012	Normatividad	Operación en banda libre	Las comunicaciones del sistema deben operar en banda permitida por el gobierno nacional para SAT.
RF013	Normatividad	No interferencia	El sistema no debe generar interferencia con otras frecuencias, ni otros servicios de telecomunicaciones donde opere.
RF014	Respuesta	Tiempo de respuesta inmediato	El sistema debe tener un tiempo de respuesta inmediato y enviar alerta a la comunidad ante cualquier eventualidad detectada.
RF015	Transmisión	Baja tasa	El protocolo de comunicaciones del sistema debe soportar bajas tasas de transmisión de datos.
RF016	Visualización	Visual en tres niveles diferentes	El sistema debe tener tres niveles de visualización de alerta hacia el usuario final, asociados a los colores del semáforo: - Rojo: Peligro inminente, señal para evacuación - Amarillo: Potencial evento, señal para estar alerta ante posibles eventos - Verde: Estado normal, señal de niveles dentro de rangos considerados normales
RF017	Alarma	Una señal sonora	El sistema debe generar, además de las señales visuales de alerta, una señal que permita activar una alarma sonora para alertar a la comunidad en caso de un evento.
RF018	Normatividad	Componentes libres de elementos contaminantes	Los componentes, elementos y materiales implementados en el sistema, deben ser amigables con el ambiente y libres de elementos contaminantes como plomo. En el caso de componentes electrónicos deben cumplir con directiva RoHS.
RF019	Almacenamiento	No almacenamiento en sitio	El sistema no almacenará información de mediciones en el sitio donde se encuentre ubicado, debe transmitir esta información a base de datos internas o externas.
RF020	Ajuste	Variación en periodos de muestreo	El sistema instalado debe permitir la realización de ajustes y variaciones en los periodos de muestreo para la captura de información
RF021	Gestión	De red y de energía	El sistema debe contar con algún subsistema local que le permita gestionar y administrar la red y garantizar que la estación de medición permanezca en modo “stand by” mientras no se transmitan datos.
RF022	Robustez	Resistencia grado IP	Las estaciones del sistema deben ser resistentes a condiciones medioambientales adversas y contar con protección IP igual o superior a grado 66.
RF023	Gestión	Detección falla de transmisión	El sistema debe identificar cuando algún transmisor falle.

## 5. DISEÑO DE UNA ALERTA TEMPRANA

Tomando en cuenta el levantamiento de requerimientos presentado en la sección anterior, el grupo de desarrollo propone la siguiente arquitectura del sistema:

El diseño sugerido es basado en un sistema de comunicaciones sobre Internet de las Cosas (IoT) [17]. En nuestro caso, fue escogido LoRaWAN [18]. El estado actual de la tecnología nos permite alcanzar distancias de comunicación sobre

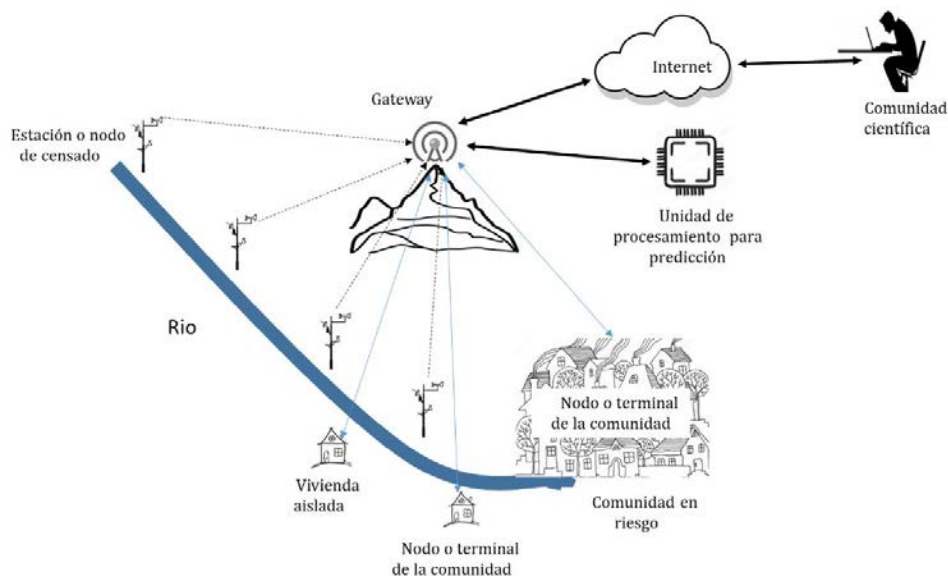
los 20 km con línea de vista y tasas de transmisión suficientes. La frecuencia escogida fue 900MHz, a pesar de que existe una versión en 433MHz que promete un mayor alcance. La escogencia se debió a un análisis previo que mostró que a futuro la frecuencia de 433MHz puede ser descontinuada. Además, los precios de los chips de comunicaciones se esperan alcancen el dólar en un futuro, aunque en la actualidad estén sobre los 10 dólares. Otra de las razones para escoger LoRaWAN es que un solo Gateway puede soportar hasta 62500 nodos o terminales.

Por un lado, las clases o tipos de terminales, de la tecnología, son ideales para aplicaciones de SAT. Por ejemplo, la Clase A permanece apagada hasta que se le indica que realice una transmisión. Después de enviada la información, entra en una ventana de recepción que termina pasado un tiempo. Este modo es ideal para los sensores, quienes pueden enviar información periódica en su funcionamiento normal, pero que ante una condición anormal puede comunicar inmediatamente de su estado. Mientras tanto, la Clase C es ideal para las terminales de la comunidad; En esta clase, las unidades permanecen en modo escucha y sólo transmiten cuando es necesario.

En el caso de los Gateways, actualmente se consiguen unidades con módulos de comunicación de ethernet o redes celulares 3G/4G. Esto permite, el envío de información a un servidor para su almacenamiento y posterior estudio. En el mercado también se pueden conseguir Gateways con capacidades de procesamiento y en los cuales podría correr un modelo de predicción básico; Además, la conexiones ethernet permiten la inserción de sistemas más robustos de procesamiento como DSP o FPGA, que darían la posibilidad de correr modelos que requieren un mayor procesamiento.

En el caso de las terminales de censado, inicialmente, sólo es necesario medidores de nivel y pluviómetros. El mercado ofrece alternativas económicas que cumplen con los requerimientos. Sensores adicionales pueden ser introducidos al sistema sin traumatismos, debido a la gran cantidad de nodos permitidos por una estación base (Gateway). Además, aplicaciones específicas para habitantes de la zona o la comunidad científica, pueden valerse de la infraestructura instalada. Una aplicación, por ejemplo, es el uso de la infraestructura para desplegar un SAT para heladas de cultivos.

Adicionalmente, el sistema requiere una aplicación corriendo de manera local para gestión de la red. Esto es, un sistema que alerte en caso de que alguno de los nodos deje de transmitir o responder. En la Figura 6 se muestra el esquema de funcionamiento de la solución propuesta. En ella, las estaciones o nodos de censado, que básicamente son compuestas por medidores de nivel y pluviómetros, envían periódicamente información al Gateway. Esta información es procesada, almacenada y subida a la nube.



**Figura 6.** Esquema de funcionamiento del sistema propuesto

Las estaciones de censado típicamente permanecen en modo de espera, despertando cada cierto tiempo para enviar la medida actual. En caso de presentarse una creciente súbita, la estación posee un sensor pasivo que cuando la cuenca llega a cierto nivel, despierta al dispositivo que realiza la generación de la alerta. Al llegar al Gateway la señal de alerta inmediatamente comunica a los nodos o terminales de la comunidad que se está presentado una creciente. Los nodos de la comunidad deben generar una señal lo suficientemente clara para alertar a la población.

La unidad de procesamiento para predicción es la encargada de correr modelos de predicción con miras a alertar a la comunidad de un posible riesgo. Esta unidad se encontrará localmente instalada, pero en la actualidad no se tiene claridad sobre la arquitectura de hardware conveniente para ella. Por otro lado, la unidad de procesamiento debe poseer la capacidad de reprogramar los periodos de muestreo de los nodos de censado. Los modelos de predicción es un tema de interés para posteriores investigaciones. El Gateway debe correr una aplicación de monitoreo del sistema, que sea capaz de reportar casos en los cuales las estaciones de censado o de la comunidad dejen de reportarse. Este reporte puede ser a una terminal adicional que sea manejada por un líder de la comunidad.

Finalmente, el SAT bajo IoT está siendo desarrollado por personal del CEET/SENA. En esta labor se ha vinculado y se cuenta con el apoyo de los semilleros de investigación. Actualmente, dos sitios están siendo estudiados para el despliegue del prototipo inicial: uno en el río Tunjuelito de la ciudad de Bogotá y otro en el río Negro en Tobia, Cundinamarca. Terminado su instalación, los datos e infraestructura serán liberados a la comunidad científica, esto para que se pueda diseñar, mejorar y construir el sistema de predicción con el apoyo de instituciones interesadas.

## **6. CONCLUSIONES**

El protocolo en el manejo de emisión de alertas que establece el IDEAM, genera tiempos de respuesta que no son manejables ante ciertos eventos, como lo son las crecientes súbitas. Esto obliga a que los protocolos tengan que ser evaluados y se deba proponer una solución tecnológica.

Para la mitigación de riesgo ante crecientes súbitas se propone el establecimiento de un Sistema de Alertas Tempranas basado en internet de las cosas. Sistema que permita realizar el procesamiento en sitio y la emisión de alertas en tiempo real.

Por otro lado, la propuesta incluye un sistema de procesamiento para correr modelos de predicción que puedan emitir alertas de manera local. Los modelos deben ser mejorados en el tiempo, estableciendo la necesidad de iniciar procesos de investigación en modelado y mejora de los modelos actualmente existentes.

## REFERENCIAS

- [1] Berren, M., Beigel, A. & Ghertner (1980). A typology for the classification of disasters. *Community Ment Health Journal* 16(2), 103-133.
- [2] Cheng, D. et al. (2018). The characteristics of the Mocoa compound disaster event, Colombia. *Landslides* 15(6), 1223-1232.
- [3] Campos, A. et al. (2012), Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial, Colombia.
- [4] Congreso de la República (1998). Ley 46 de 1988. Colombia.
- [5] Presidencia de la República (1989). Decreto Ley 919 de 1989. Colombia.
- [6] Congreso de la República. (2012). Ley 1523 de 2012. Colombia.
- [7] Rivera, H. (2001). Lineamientos ingenieriles para la administración pública del agua con énfasis en la predicción de la oferta mensual hídrica bajo escenario no estacionario. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, Uruguay.
- [8] Rivera, H. et al. (2008), Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos. IDEAM, Bogotá.
- [9] Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (2010). Implementación de un sistema de alerta temprana para la cuenca del río Combeima, departamento del Tolima – Colombia.
- [10] Fernández, C. & Sabas, C. (2012). Sistema de Alerta Temprana Centrado en la Población para la Cuenca Media del Río Otún. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [11] Bravo, C. (2016). Análisis de las experiencias de sistemas de alerta temprana ante inundaciones y avenidas torrenciales en Risaralda: Cuencas de los ríos Consota y San Eugenio, y la quebrada Dosquebradas. Trabajo grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [12] Et al. (2010). Classified real-time flood forecasting by coupling fuzzy clustering and neural network. *International Journal of Sediment Research* 25(2), 134-148.
- [13] Borga, M. et al. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environmental Science & Policy* 14(7), 834-844.
- [14] Domínguez, E. & Lozano, E. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 38(148), 321-332.
- [15] EIA (1999). Processes for Engineering a System EIA-632. Electronic industries Alliance.
- [16] Mendoza, A. et al. (2016). Guía para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Colombia.
- [17] Buyya, R. & Dastjerdi, A. (2016). *Internet of Things: Principles and paradigms*. Elsevier.
- [18] Lora Alliance (2015). A technical overview of LoRa and LoRaWAN. Alliance Technical Marketing Workgroup.



# Aplicabilidad en el territorio colombiano de los modelos de la UIT para cálculo de pérdidas de propagación debidas al clutter

Félix Gómez<sup>1</sup>  
Guillermo Valencia<sup>2</sup>  
Edgar Rodríguez<sup>3</sup>  
Universitaria Agustiniana  
Bogotá – Colombia

La propagación de señales radioeléctricas está condicionada, entre otros elementos, por el tipo de vegetación presente en el entorno de radiocomunicaciones. Debido a esto la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT) ha generado unos modelos para calcular las pérdidas de potencia en un radioenlace debido a la vegetación y otros obstáculos presentes, en general estos obstáculos son llamados clutter. Los modelos generados por la UIT son usados en todo el mundo y estos son creados a partir de mediciones realizadas en diferentes partes del mundo, pero América Latina es uno de los lugares de los que menos tiene información. Debido a lo anterior en la Universitaria Agustiniana se planteó un proyecto de investigación para comparar las pérdidas de un radioenlace medidas en el territorio colombiano, con las calculadas con los modelos de la UIT y así verificar su precisión. En este capítulo se describen los diferentes modelos que se tendrán en cuenta en la investigación y las experiencias de otros investigadores en la realización de mediciones de atenuación de la señal de un radioenlace, específicamente en el rango de frecuencia de 140 MHz a 4 GHz.

## 1. INTRODUCCIÓN

El espectro radioeléctrico reviste una importancia insospechada años atrás. Siendo un recurso escaso, obliga a la necesidad de hacer una planeación lo más eficiente posible, a fin de garantizar que la mayor cantidad de interesados pueda hacer uso de este invaluable recurso. Para tal fin, la Unión Internacional de Telecomunicaciones –UIT–, con el apoyo de más de ciento noventa estados miembros, se ha dado a la tarea de establecer una serie de recomendaciones que, con base en las condiciones de propagación de las ondas bajo determinadas circunstancias, permita determinar con alta probabilidad su comportamiento en términos penetración y cobertura.

Las recomendaciones en las que se aborda esta temática en particular se compilan en lo que la UIT ha denominado Serie P. Algunas de estas recomendaciones se centran en el estudio de las perturbaciones, alteraciones o afectaciones a las que se ven sometidas las ondas debido al clutter en el que se propagan. Al profundizar en la normativa, es posible inferir que, salvo en contadas excepciones, las recomendaciones no toman en cuenta condiciones particulares de regiones tales como Colombia, en las que la presencia de tres cordilleras, un inmenso llano, dos mares y una riqueza y diversidad en vegetación insondable, hacen que las ondas parezcan caprichosas a las distintas condiciones de clutter.

## 2. NORMATIVA INTERNACIONAL

Este proyecto focaliza su objeto de estudio en determinar si las recomendaciones establecidas por la UIT son realmente aplicables en Colombia o si se requiere anexas a la normativa internacional, las condiciones particulares del territorio colombiano. En primer lugar, se hace un estudio pormenorizado de la normativa en relación con la forma de medir y calcular el comportamiento de las ondas radioeléctricas en diferentes bandas de frecuencias para distintas consideraciones de clutter. En segundo lugar, se hacen mediciones de campo utilizando algunos de los modelos de propagación y cálculo de pérdidas, de la UIT. Finalmente se elabora un comparativo entre los resultados esperados y los obtenidos para diferentes consideraciones de clutter.

La investigación ha permitido observar la importancia de los modelos de estimación de las atenuaciones, en especial los creados por la UIT, es por esto que a continuación se presenta una revisión de la normativa UIT en relación con el tema objeto de estudio. El estado actual de la investigación ha permitido observar a profundidad la recomendación ITU-R P.2108-0 Prediction of Clutter LOS. Las demás recomendaciones se presentan como parte del estado del arte y serán analizadas al detalle durante el desarrollo de la investigación.

### 2.1 Recomendación ITU-R P.2108-0

En esta Recomendación se describen métodos para calcular las pérdidas debidas a la ocupación del suelo en frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 100 GHz. En la norma se describe un conjunto de modelos que pueden emplearse para calcular las pérdidas debidas a la ocupación del suelo en diversos entornos [1]. Estos modelos pueden utilizarse como corrección última a los modelos de larga distancia o por encima de los tejados. Se definen categorías para los entornos de ocupación del suelo y se describen métodos para calcular las pérdidas en el trayecto entre el tejado y el terminal con ocupación del suelo. Se establece que se han de utilizar modelos estadísticos cuando no se

---

<sup>1</sup> felix.gomez@uniagustiniana.edu.co

<sup>2</sup> guillermo.valenciap@uniagustiniana.edu.co

<sup>3</sup> edgar.rodriguez@uniagustiniana.edu.co

conozca con exactitud el trayecto radioeléctrico, como la anchura de las calles, la altura de los edificios y la profundidad de la vegetación. La norma toma en cuenta las siguientes recomendaciones relacionadas:

- Recomendación UIT-R P.452 describe un método de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias desde unos 0,1 GHz a 50 GHz, teniendo en cuenta los mecanismos de interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros y en cielo despejado;
- Recomendación UIT-R P.833 presenta varios modelos que permiten evaluar el efecto de la vegetación en las señales de ondas radioeléctricas entre 30 MHz y 60 GHz;
- Recomendación UIT-R P.1411 contiene datos y modelos para los sistemas radioeléctricos de corto alcance, principalmente dentro del entorno urbano entre 300 MHz y 100 GHz;
- Recomendación UIT-R P.1812 describe un método de predicción de la propagación adaptado a los servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 3 GHz;
- Recomendación UIT-R P.2040 contiene fórmulas básicas para calcular la reflexión y la penetración en materiales de construcción, y una representación armonizada de las propiedades eléctricas de los materiales de construcción por encima de unos 100 MHz;
- Recomendación UIT-R P. [BEL] describe un modelo estadístico para calcular las pérdidas de penetración en edificios a frecuencias comprendidas entre unos 80 MHz y 100 GHz.

La norma recomienda que se utilice el material adjunto en el Anexo 1 de la Recomendación para calcular las pérdidas debidas a la ocupación del suelo. La Recomendación establece 3 modelos de propagación, a saber: Modelo de corrección altura-ganancia para el terminal, Modelo estadístico de las pérdidas debidas a la ocupación del suelo para trayectos terrenales, Modelo estadístico de pérdidas por la ocupación del suelo para trayectos Tierra-espacio y aeronáuticos. El resumen de los modelos propuestos se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 14.** Resumen de los modelos propuestos en el Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0

Entorno del terminal	Ref.	Frecuencias (GHz)	Descripción
Terminal por debajo de la altura representativa del obstáculo	§ 3.1	0,03 – 3	Se debe aplicar una corrección de pérdidas en el extremo a las pérdidas de transmisión básicas calculadas a/desde la altura representativa del obstáculo utilizada. Se aplica tanto al extremo transmisor como al receptor del trayecto.
Terminal terrenal dentro del obstáculo	§ 3.2	2 – 67	Modelo estadístico que puede aplicarse para modelizar la distribución de pérdidas debidas a la ocupación del suelo en entornos urbanos y suburbanos. Esta corrección puede aplicarse a ambos extremos del trayecto.
Un terminal dentro del obstáculo y el otro es un satélite, aeronave u otra plataforma por encima de la superficie de la Tierra.	§ 3.3	10 – 100	La distribución estadística de las pérdidas debidas a la ocupación del suelo no rebasada en el porcentaje de ubicaciones para ángulos de elevación entre 0 y 90 grados.

Fuente: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108-0-201706-I/es>

En la Recomendación se define el concepto de “ocupación del suelo” en el contexto de las Recomendaciones UIT-R de la serie P., así: La ocupación del suelo se refiere a obstáculos, como edificios o vegetación, situados sobre la superficie de la Tierra, pero no por el terreno propiamente dicho. La ocupación del suelo alrededor del terminal transmisor/receptor puede afectar considerablemente a la propagación global. Normalmente el obstáculo más cerca del terminal es el que más afecta a la propagación, pero la distancia real depende de la naturaleza de la ocupación y de los parámetros radioeléctricos.

La recomendación señala que los modelos de cálculo de pérdidas debidas a la ocupación del suelo que se describen en la norma se basan en estadísticas. En cuanto a corrección final para el modelo de propagación a lo largo del trayecto, las “pérdidas debidas a la ocupación del suelo” se definen como la diferencia entre las pérdidas de transmisión y las pérdidas de transmisión básicas con y sin la presencia de ocupación del suelo en el terminal en cualquiera de los dos extremos del trayecto, siendo constantes los demás parámetros del trayecto. Los modelos de propagación en trayectos cortos tienen en cuenta los efectos de la ocupación del suelo a lo largo de todo el trayecto.

Para el desarrollo del proyecto, la investigación en torno a estos tres modelos se ha centrado en el estudio del Modelo de corrección altura-ganancia para el terminal, que es el que mejor se acomoda a las condiciones de clutter que serán analizadas. Este método, referenciado para ser utilizado en la banda de frecuencias 0,03 a 3 GHz, “permite obtener la mediana de las pérdidas debidas a los diferentes alrededores del terminal”, en función de la “pérdida por obstrucción y la reflexión debida a obstáculos en la altura representativa, así como la dispersión y la reflexión debidas a la superficie y a obstáculos menores”. “El método distingue entre dos casos generales: para las categorías boscosa y urbana, se asume que el mecanismo dominante es la difracción por encima de los obstáculos; para el resto de categorías, se asume que domina la reflexión o la dispersión”. El método plantea que se pueden añadir pérdidas adicionales de transmisión,  $A_h$ , en función de la altura representativa del obstáculo utilizada.

El método emplea una aproximación de las pérdidas por difracción para una sola arista afilada como función de parámetro adimensional,  $v$ , expresadas mediante las ecuaciones (1) a (5).

$$J(v) = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \quad (1)$$

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} \quad (2)$$

$$K_{nu} = 0.342 \sqrt{f} \quad (3)$$

$$\theta_{clut} = \tan^{-1} \left( \frac{h_{dif}}{w_s} \right) \quad (4)$$

$$h_{dif} = R - h \quad (5)$$

Para calcular pérdidas adicionales, Si  $h \geq R$  entonces  $A_h = 0$ . Si  $h < R$  entonces  $A_h$  puede tomar una de las ecuaciones (6), (7) o (8), dependiendo del tipo ocupación del suelo.

$$A_h = J(v) - 6.03 \quad (6)$$

$$A_h = -K_{h2} \log(h/R) \quad (7)$$

$$K_{h2} = 21.8 + 6.2 \log(f) \quad (8)$$

El Cuadro 3 del Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0 presenta la Información por omisión de la altura representativa del obstáculo R, lo cual se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**Tabla 15.** Información por omisión de la altura representativa del obstáculo, R (cuando no se dispone de información local) con base en el Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0

Tipo de ocupación del suelo	R (m)	Método de cálculo $A_h$
Agua/mar	10	Ecuación (7)
Espacio abierto/rural	10	Ecuación (7)
Suburbano	10	Ecuación (6)
Urbano/arboleda/ bosque	15	Ecuación (6)
Urbano denso	20	Ecuación (6)

Fuente: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108-0-201706-1/es>

El Cuadro 2 del Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0 presenta los parámetros del modelo de corrección altura-ganancia del terminal, tal como se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 16.** Parámetros del modelo de corrección altura-ganancia del terminal, del Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor por omisión
Frecuencia	$f$	GHz	-
Altura de la antena	$h$	m	-
Anchura de la calle	$w_s$	m	27
Altura representativa del obstáculo	$R$	m	Véase Tabla 15
Tipo de ocupación	-	-	-

Fuente: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108-0-201706-1/es>

A fin de determinar las pérdidas con base en este modelo, se ha considerado un sistema con las siguientes características:

Tipo de ocupación: Espacio abierto/rural

$f=0.151$  GHz

$h=10$  m

$w_s=27$  m

$R=10$  m

Con lo cual se tiene:

$J(v)=6,033$  dB, a partir de la ecuación (1)

$A_h=0$  dB, puesto que  $h=R$

Pérdida total = 6,033 dB

Teniendo en cuenta los parámetros y restricciones de las Tablas 1, 2 y 3, las ecuaciones (1) a (8) y, aplicando este mismo procedimiento, se ha calculado LOS, con base en la Recomendación ITU-R P.2108-0, para las diferentes frecuencias y condiciones de clutter consideradas dentro del objeto de investigación. La Tabla 4, presenta los resultados de este ejercicio.

## 2.2 Recomendación UIT-R P.833-9

En esta Recomendación se presentan varios modelos que permiten evaluar el efecto de la vegetación en las señales de ondas radioeléctricas. La norma presenta modelos aplicables a diversos tipos de vegetación para varias geometrías de trayecto adaptadas para calcular la atenuación de las señales que pasan a través de la vegetación. La Recomendación contiene también datos medidos de la dinámica del desvanecimiento debido a la vegetación y características de la dispersión del retardo. La norma recomienda que se utilice el contenido del Anexo 1 para evaluar la atenuación debida a la vegetación con diversos modelos para la gama de frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 100 GHz [2]. La Recomendación establece 2 modelos de propagación generales, a saber: Obstrucción en zonas boscosas, Obstrucción por un solo obstáculo vegetal.

**Tabla 17.** Predicción de LOS para diferentes frecuencias y condiciones de clutter, a partir de lo establecido en el Anexo 1 de la Recomendación ITU-R P.2108-0

<i>Datos de entrada</i>				<i>Datos de salida</i>		<i>LOS (dB)</i>	
<i>f (GHz)</i>	<i>h (m)</i>	<i>R (m)</i>	<i>Ws</i>	<i>Ocupación del suelo</i>	<i>J(v) (dB)</i>		<i>Ah (dB)</i>
0,151	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
0,151	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
0,151	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
0,151	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	7,13589518	1,1058951	8,24179037
0,151	10	20	27	Urbano denso	8,20056286	2,1705628	10,3711257
0,358	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
0,358	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
0,358	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
0,358	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	7,73082871	1,7008287	9,43165742
0,358	10	20	27	Urbano denso	9,34640226	3,3164022	12,6628045
0,581	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
0,581	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
0,581	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
0,581	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	8,19318701	2,1631870	10,356374
0,581	10	20	27	Urbano denso	10,2148056	4,1848055	14,3996111
0,746	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
0,746	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
0,746	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
0,746	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	8,47772274	2,4477227	10,9254455
0,746	10	20	27	Urbano denso	10,7375293	4,7075293	15,4450587
0,856	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
0,856	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
0,856	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
0,856	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	8,64934016	2,6193401	11,2686803
0,856	10	20	27	Urbano denso	11,0481268	5,0181268	16,0662537
1,902	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
1,902	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
1,902	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
1,902	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	9,89190851	3,8619085	13,753817
1,902	10	20	27	Urbano denso	13,1843735	7,1543735	20,3387471
2,9	10	10	27	Agua/mar	6,03285221	0	6,03285221
2,9	10	10	27	Espacio abierto/rural	6,03285221	0	6,03285221
2,9	10	10	27	Suburbano	6,03285221	0	6,03285221
2,9	10	15	27	Urbano/arboleda/ bosque	10,745	4,7149999	15,4599999
2,9	10	20	27	Urbano denso	14,5363368	8,5063368	23,0426736

Fuente: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108-0-201706-1/es>

### 2.3 Reporte ITU-R P.2090

La Recomendación UIT R P.833-5 detalla el modelo basado en RET (La teoría de la transferencia de energía radiativa (RET) permite un cálculo analítico de la atenuación de un medio de dispersión, como la vegetación) y proporciona los parámetros de entrada necesarios para varias especies de árboles. Sin embargo, si la vegetación es diferente a la que se encuentra en la Recomendación UIT R P.833-5, se pueden derivar los parámetros de entrada para RET a partir de las mediciones. Este Informe detalla cómo derivar los parámetros RET de una medición. El Reporte señala que el RET requiere seis parámetros de entrada, cuatro de los cuales son específicos para el medio de dispersión y dos son geometría y descriptores del sistema. Los cuatro parámetros dependientes del medio deben establecerse experimentalmente y dependen del tipo de vegetación, la frecuencia y el estado de foliación, así:

- $\alpha$ , la relación entre la potencia dispersa delantera y la potencia dispersa total;
- $\beta$ , la anchura del haz de la función de fase;
- $\sigma\tau$ , la sección transversal combinada de absorción y dispersión (a S);
- $W$ , el albedo;
- $\gamma R$ , la anchura del haz de la antena de recepción;
- $d$ , la distancia a la vegetación (m).

La norma establece que la mejor manera de determinar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  es midiendo la función de dispersión, que suele denominarse función "fase" del medio vegetal. La función de fase caracteriza el comportamiento de dispersión del medio a distancias cortas después de la interfaz aire/vegetación. Cuando los cuatro parámetros RET se extraen únicamente de los datos de atenuación de la vegetación, los parámetros resultantes pueden carecer de propiedades físicas reales de la dispersión de la vegetación en la mayoría de los casos, aunque los parámetros podrían ajustarse bien a los datos de medición. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente que la medición de la función de fase se realice siempre que sea posible.

### 2.4 Recomendación UIT-R P.1410-5

La Recomendación hace referencia a sistemas que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz, dando una orientación sobre cobertura con visibilidad directa (LoS, line-of-sight) y mecanismos preponderantes de propagación

sin LoS. La norma proporciona métodos de lluvia para estimar la mejora de diversidad seleccionando la mejor estación de base entre dos y la reducción de cobertura con lluvia [3]. Se proporciona asimismo una orientación con respecto a la distorsión de banda amplia.

La norma recomienda que la información sobre propagación y los métodos de predicción expuestos en el Anexo 1 se utilicen a la hora de diseñar sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente. La recomendación establece que la mejor manera de estimar la probabilidad de bloqueo producido por edificios es la utilización de técnicas de trazado de rayos con datos reales extraídos de bases de datos exhaustivas sobre los edificios y el terreno, para lo cual describe brevemente los requisitos para las técnicas de trazado de rayos. En lugares donde no se dispone de bases de datos adecuadas se recomienda el modelo estadístico esbozado en la misma norma.

La norma señala que la existencia de árboles que bloqueen puede limitar drásticamente el número de hogares a los que pueda proporcionarse un servicio. Por consiguiente, es muy importante disponer de un modelo fiable para simular los efectos y el grado de atenuación debida a la vegetación, ya que, si los receptores se encuentran cerca del transmisor, el margen del sistema puede ser tan pequeño que la intensidad de la señal que se propague a través de un solo árbol sea insuficiente para prestar un servicio. La norma recomienda la utilización del modelo que figura en la Recomendación UIT-R P.833 para determinar la importancia de la atenuación debida a la vegetación.

## **2.5 Recomendación ITU-R P.1411-9**

La Recomendación proporciona orientaciones sobre la propagación exterior de corto alcance en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz [4]. Se proporciona información sobre modelos de pérdida de trayecto para entornos con línea de vista (LoS) y sin línea de vista (NLoS), pérdida de entrada al edificio, modelos de trayecto múltiple para ambos entornos del cañón de la calle y sobre tejados, número de componentes de señalización, características de polarización y características de desvanecimiento. Esta Recomendación también puede utilizarse en estudios de compatibilidad. La norma, toma en cuenta las siguientes recomendaciones relacionadas:

- Recomendación UIT-R P.1238 proporciona orientaciones sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz y debe consultarse para situaciones en las que existen condiciones tanto en interiores como en exteriores;
- Recomendación UIT-R P.1546 proporciona orientaciones sobre propagación para los sistemas que funcionan a partir de distancias de 1 km y en la gama de frecuencias de 30 MHz a 3 GHz;
- Recomendación UIT-R P.2040 proporciona orientaciones sobre los efectos de las propiedades y estructuras de los materiales de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas;
- Recomendación UIT-R P.2109 proporciona modelos estadísticos para las pérdidas de entrada en edificios.

La norma recomienda que se adopten la información y los métodos del Anexo 1 para la evaluación de las características de propagación de los sistemas de radiocomunicaciones de corto alcance para exteriores entre 300 MHz y 100 GHz, cuando proceda.

## **2.6 Recomendación ITU-R P.311-17**

La Recomendación UIT-R P.311 describe los datos experimentales utilizados por la Comisión de Estudio 3 de la UIT y los criterios de aceptación de datos [5]. Esta base de datos se utiliza para probar los modelos de propagación examinados por los Grupos de Trabajo de la Comisión de Estudio 3.

## **2.7 Recomendación UIT-R P.1812-4**

La norma es un complemento a la Recomendación UIT-R P.1546 y describe un método de predicción de la propagación adaptado a los servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 3 GHz [6]. La recomendación predice los niveles de señal en la mediana de la distribución por trayectos múltiples rebasados durante un porcentaje de tiempo,  $p\%$ , donde  $1\% \leq p \leq 50\%$ , y en un porcentaje dado de ubicaciones,  $pL$ , donde  $1\% \leq pL \leq 99\%$ . El método proporciona un análisis detallado basado en el perfil del terreno. La norma establece que conviene utilizar el método para realizar predicciones en sistemas de radiocomunicaciones que emplean circuitos terrenales con trayectos que van desde 0,25 km hasta unos 3000 km de longitud, con los dos terminales ubicados a una altura de hasta unos 3 km sobre el suelo. De igual forma, señala que no conviene utilizar el método para predecir la propagación en circuitos radioeléctricos aire-suelo ni espacio-Tierra. La norma, toma en cuenta las siguientes recomendaciones relacionadas:

- Recomendación UIT-R P.528 proporciona directrices sobre la predicción y la pérdida del trayecto de punto a zona para el servicio móvil aeronáutico en la gama de frecuencias 125 MHz a 30 GHz y para distancias de 1800 km;
- Recomendación UIT-R P.452 proporciona directrices para la evaluación detallada de la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 0,1 GHz;
- Recomendación UIT-R P.617 proporciona directrices sobre la predicción de la pérdida del trayecto punto a punto en sistemas de radioenlaces transhorizonte en frecuencias superiores a 30 MHz y distancias de 100 y 1000 km;
- Recomendación UIT-R P.1411 proporciona directrices sobre la predicción para servicios de exteriores de corto alcance (1 km);

- Recomendación UIT-R P.530 proporciona directrices sobre la predicción de la pérdida del trayecto punto a punto en sistemas terrenales con visibilidad directa;
- Recomendación UIT-R P.1546 proporciona directrices sobre la predicción de intensidades de campo punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas, basándose principalmente en análisis de datos experimentales;
- Recomendación UIT-R P.2001 contiene un modelo propagación terrenal de gran alcance, en la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz, incluidas las estadísticas sobre incremento y desvanecimiento de la señal, apropiado para el método de Monte Carlo;
- Recomendación UIT-R P.2040 ofrece orientación sobre los efectos de las propiedades de los materiales de construcción y las estructuras de la propagación de ondas radioeléctricas, recomienda que se adopte el procedimiento indicado en el Anexo 1.

La norma recomienda aplicar el método de predicción de la propagación descrito en el presente anexo para la evaluación detallada de los niveles de señal apropiados relativos a los servicios terrenales punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas. El método predice el nivel de señal (es decir, la intensidad de campo eléctrico) rebasado durante un porcentaje dado,  $p\%$ , de un año medio, donde  $1\% \leq p \leq 50\%$ , y en  $pL\%$  de ubicaciones, donde  $1\% \leq pL \leq 99\%$ . Por consiguiente, el método se puede utilizar para predecir tanto la zona de servicio y la disponibilidad para un nivel de señal deseado (cobertura) como la reducción de esta zona y de la disponibilidad ocasionada por señales no deseadas, cocanal y/o de canal adyacente (interferencia).

De acuerdo con la Recomendación, el modelo de propagación de este método es simétrico, en el sentido de que en él se tratan de la misma forma los dos terminales radioeléctricos. Desde el punto de vista del modelo, no importa cuál de los terminales es el transmisor y cuál el receptor. No obstante, por ser conveniente para la descripción del modelo, se utilizan los términos «transmisor» y «receptor» para indicar los terminales situados al inicio y al final del trayecto radioeléctrico, respectivamente. Aunque la normativa anteriormente expuesta constituye la base documental que soporta el proyecto de investigación, adicionalmente, el UIT-R ha promulgado otras recomendaciones y resoluciones que aportan conceptualmente al proyecto y que pueden resumirse en las siguientes:

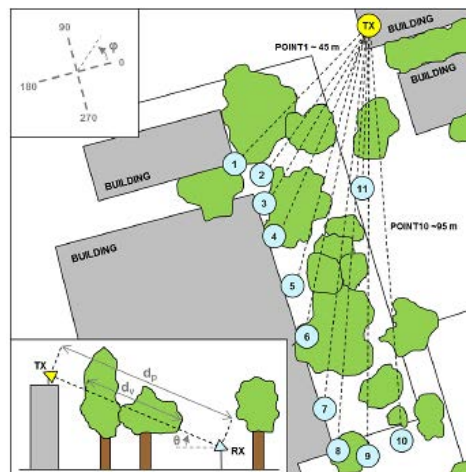
- Recomendación UIT-R P.684-7. Predicción de la intensidad de campo en frecuencias por debajo de unos 150 kHz
- Recomendación UIT-R P.845-3. Medición de la intensidad de campo en ondas decamétricas
- Recomendación UIT-R P.1058-2. Bases de datos topográficos digitales para estudios de propagación
- Recomendación UIT-R P.1240-2. Métodos del UIT-R para la predicción de la MUF básica, de la MUF operacional (o MUF de explotación) y trayecto del rayo
- Recomendación UIT-R P.1321-5. Factores de propagación que afectan a los sistemas con técnicas demodulación digital en ondas kilométricas y hectométricas
- Recomendación UIT-R P.1546-5. Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz
- Recomendación UIT-R P.341-6. Noción de pérdidas de transmisión en los enlaces radioeléctricos
- Recomendación UIT-R P.525-3. Cálculo de la atenuación en el espacio libre
- Recomendación UIT-R P.678-3. Caracterización de la variabilidad de los fenómenos de propagación y estimación del riesgo asociado al margen de propagación
- Recommendation ITU-R P.453-13. The radio refractive index: its formula and refractivity data
- Recommendation ITU-R P.1057-5. Probability distributions relevant to radio wave propagation modellin
- Recommendation ITU-R P.1144-9. Guide to the application of the propagation methods of Radio Communication Study Group 3
- Recommendation ITU-R P.1407-6. Multipath propagation and Parameterization of its characteristics
- Recommendation ITU-R P.526-14. Propagation by diffraction
- Report ITU-R P.2402-0. A method to predict the statistics of clutter loss for earth-space and aeronautical paths

### 3. ESTADO DEL ARTE

Las normas mencionadas anteriormente se usarán para calcular las pérdidas esperadas en el escenario donde se van a hacer las mediciones, para que de esta forma se pueda comparar las pérdidas esperadas según las normativas de la UIT y las mediciones realizadas en campo. Respecto a las mediciones de campo los profesores del departamento de sistemas electrónicos de la Universidad de Aalborg de Dinamarca y del instituto de Desarrollo tecnológico de Manaus Brasil [7] realizaron un análisis sobre la propagación a través de mediciones de atenuación de señales de 24 GHz las cuales fueron transmitidas través de la vegetación, para esto usaron antenas de bocina y encontraron que las pérdidas estaban entre 2,6 y 3,8 dB/m para los primeros metros al interior del área con vegetación (Figura 1).

Ellos escogieron un entorno con vegetación ya que esta es uno de los obstáculos más comunes de los entornos exteriores, usualmente la atenuación debida a la vegetación se modela como una pérdida adicional a la debida al espacio libre, dividida por la longitud total que viaja la señal de radio a través de la vegetación. Esta pérdida no es lineal ya que en los primeros metros las pérdidas son grandes debido a los obstáculos en el camino directo, pero después esta pérdida deja de crecer tan rápido como al comienzo debido a las múltiples contribuciones de los diferentes obstáculos. Es importante tener en cuenta la frecuencia de la portadora ya que la atenuación es menor para

frecuencias inferiores a los 6 GHz que para aquellas en el rango de 3-30 GHz y 30-300 GHz. Lo anterior se debe al tamaño de la longitud de onda y a que entre más pequeña sea esta más va a ser bloqueada por objetos como hojas y el tronco de los árboles debido a la zona de Fresnel.



**Figura 1.** Puntos de medición y geometría considerada

El experimento que los profesores realizaron consistió en ubicar dos antenas tipo corneta de la siguiente forma, la antena del equipo transmisor se ubicó en el techo de un edificio de 15 metros y la antena del equipo receptor se ubicó entre la vegetación con una altura de 1.75 metros, ambas antenas tenían una ganancia de 22 dBi y un ancho del haz de media potencia de 25 grados y la mayor atenuación obtenida fue de 170 dB. Realizaron mediciones en 11 diferentes ubicaciones del equipo receptor y la distancia en cada uno de los puntos varió entre 45 y 95 metros. La longitud de vegetación que tuvo que atravesar la señal en promedio para cada uno de los puntos fue de 10 metros. Para garantizar un correcto muestreo y detección de los máximos, en cada ubicación se tomaron 120 mediciones ya que estas se tomaron cada 9 grados de azimut para cubrir los 360 grados y cada 10 grados de elevación en un rango entre +10 y +30 grados.

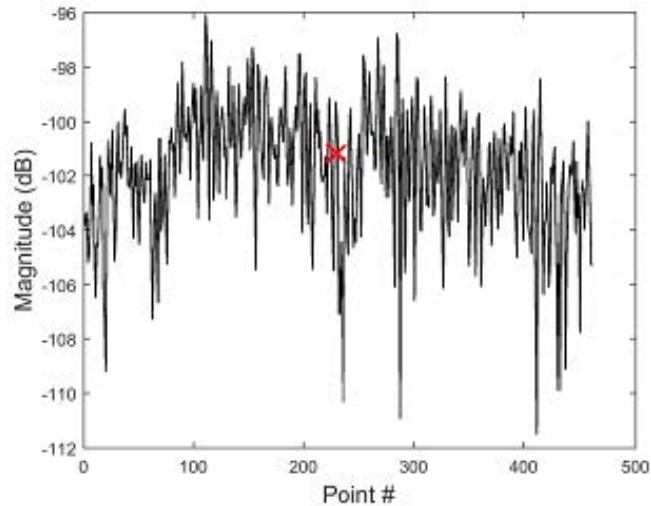
Después de realizar las mediciones estas fueron comparadas con modelos existentes tales como COST 235, Weissberger, FITU-R, ITU-R Slant Path e ITU-R Terrestrial, pero las predicciones de estos modelos son diferentes a los valores obtenidos y una de las razones para estas diferencias es la forma en la que se realizaron las mediciones. De los modelos analizados el COST 235 y el ITU-R slant path fueron capaces de predecir las pérdidas con un error de aproximado de 6.9 db. Según la recomendación P-833-8 se debe usar el modelo Terrestrial de la UIT el cual requiere el cálculo de tres coeficientes los cuales estuvieron en el rango del modelo S0 para las mediciones realizadas, pero se observó que para la máxima atenuación que da el modelo se usa el factor  $f^\alpha$  el cual es muy alto para la frecuencia que se trabajó, aunque es apropiado para frecuencias cercanas a los 3 GHz ya que para estas fue que se desarrolló el modelo, por lo tanto los autores sugieren que este factor sea corregido para mayores frecuencias.

Análisis como el anterior permiten que los modelos sean actualizados para ser usados en servicios emergentes que usen frecuencias más altas y de esta forma usar de forma más eficiente el espectro. Otra forma de usar de forma más eficiente el espectro es cuando dos servicios usan la misma frecuencia y un ejemplo de esto son las reuniones de grupos de trabajo que organizó la CSMAC (Commerce Spectrum Management Advisory Committee) para investigar la viabilidad de compartir espectro entre sistemas comerciales y federales en la banda de 1755-1780 MHz. Para estas reuniones se usó la recomendación ITU-R 9.528 para predecir los niveles de potencia que adicionan los equipos de los usuarios. Investigadores del instituto de ciencias de las telecomunicaciones [8] realizaron mediciones de propagación en varias ciudades para crear un modelo de clutter que soportara la viabilidad de compartir el espectro de los sistemas en mención.

Las mediciones fueron realizadas en San Diego CA, Denver CO y Washington D.C. El transmisor usado consistió en un generador de señales, un oscilador de rubidio, un amplificador de potencia y una antena omnidireccional que se ubicó a una altura de 10 metros. El receptor consta de un analizador de señales vectoriales (VSA), un analizador de espectro (incluye GPS), un medidor de potencia, un atenuador de potencia, un oscilador de rubidio, una antena unidireccional y un computador para almacenar la información. A los valores medidos se les realizó el siguiente tratamiento, se guardaron valores de potencia durante 500 ms por cada medición y junto a las coordenadas del GPS fueron guardadas en una estructura de datos de Matlab, la media de los valores de potencia es lo que finalmente se guarda junto a las coordenadas del GPS, la posición del GPS después es usada para hacer los cálculos de pérdidas debido a la trayectoria y al espacio libre para ese punto (Figura 2).

En cada una de las ciudades se escogieron lugares que representaran las áreas urbanas, residenciales y de ser posible las áreas rurales. El transmisor se dejó en una ubicación fija (potencia de 40 dBm) y el receptor que se encontraba ubicado en un camión se fue desplazando a lo largo de las ciudades por lo lugares mencionados anteriormente. Antes de realizar las mediciones se analizó el espectro para escoger una frecuencia que no estuviera utilizada y por lo tanto

no se generaran interferencias a otros servicios. Al analizar los datos se observó que las perdidas eran mayores en áreas que tenían calles estrechas y vegetación.

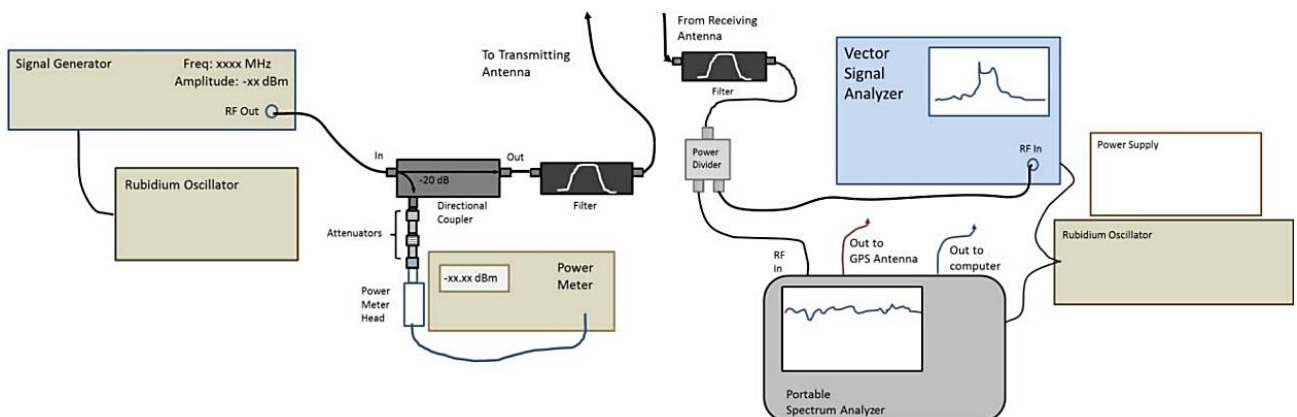


**Figura 2.** Valores obtenidos por el analizador de espectro en 500 ms

Otra de las aplicaciones que puede tener la modelación de la atenuación debido al clutter es para hacer más eficiente la prestación de un servicio y es por esto que en la Escuela de Información y Electrónica del Instituto de Tecnología de Beijing [9] se realizó un estudio para conocer el rango de detección de un radar cuando este encuentra obstáculos como los arboles de un bosque. La atenuación debida a los arboles depende de la frecuencia, tipo de polarización, ángulo de incidencia y tipo de árboles, por todo lo anterior se evidencia la importancia de seleccionar un modelo apropiado para mejorar la precisión de los resultados de la simulación.

Además de tener en cuenta la atenuación debido a los árboles, hay que tener en cuenta la atenuación del clutter del terreno ya que debido a superficies irregulares se presenta el efecto de dispersión y por lo tanto la señal recibida tendría un componente de la potencia de la dispersión debido al clutter del terreno. Todo lo anterior lleva a la conclusión de que hay que analizar la potencia debido al ruido y debido al clutter del terreno y solo se debe tener en cuenta la que tenga más potencia al momento de hacer un procesamiento a la información recibida.

Debido a que la atenuación por clutter (vegetación y estructuras hechas por el hombre) siempre está cambiando ya que nuestros paisajes no son estáticos, los ingenieros del Instituto de ciencias de las telecomunicaciones [10] realizaron una comparación entre las mediciones que realizaron y los resultados obtenidos de usar el modelo de terreno irregular (ITM). Este modelo requiere perfiles de los terrenos los cuales son obtenidos a partir de las bases de datos de los terrenos y se usan para estimar la reflexión, difracción y perdidas por dispersión, pero actualmente este modelo no incluye las perdidas por clutter. Una forma de aumentar la precisión de los modelos es usar LIDAR, una tecnología que permite determinar la distancia desde un punto a diferentes obstáculos que pueda tener una transmisión, pero las bases de datos que se crearon usando esta tecnología aun no cubren todo Estados Unidos por lo que se deben crear otras bases de datos para suplir esta información. En la Figura 3 se muestra un esquema de los equipos usados para la recepción y transmisión. El mástil de la antena de transmisión se mantuvo a una altura de 18 metros.



**Figura 3.** Equipos de transmisión y recepción

Los resultados obtenidos serán comparados con el modelo ITM el cual fue desarrollado para propósitos generales y predice la potencia de una señal en función de la distancia. Este modelo aplica para señales que tengan frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz y distancias mayores a 1 Km, y se basa en los principios electromagnéticos, análisis estadísticos de las características de los terrenos y en mediciones.



#### 4. MEDICIONES DE ATENUACIÓN

Para realizar las mediciones de las pérdidas de propagación se va a transmitir una señal en cada uno de los rangos de frecuencia de interés para este estudio, estos rangos son:

- 138-174 MHz
- 250-470 MHz
- 470-698 MHz
- 698-806 MHz
- 806-900 MHz
- 700-2100 MHz

La transmisión se realizará usando un radio definido por software (SDR) de referencia HackRF One, un amplificador y una antena omnidireccional. El SDR escogido funciona en el rango de frecuencia de 1 MHz a 6 GHz y su programación se realizó usando el software libre llamado GNU Radio Companion. En este software se configuró una transmisión FM teniendo como variable la frecuencia de la portadora la cual se ira variando dependiendo del rango en el que se esté trabajando, en la Figura 4 se puede observar el diseño realizado.

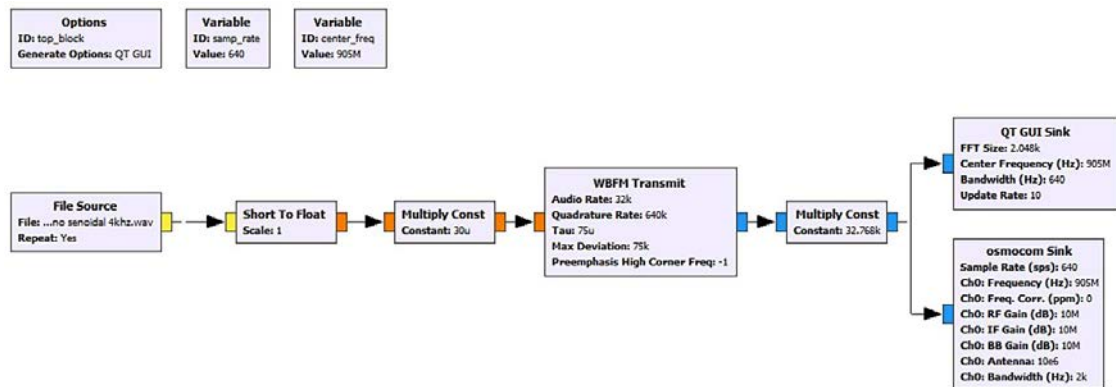


Figura 4. Diagrama de bloques de la transmisión FM usando el SDR

Para realizar mediciones en tiempo real de la señal transmitida se usó un acoplador direccional para poder conectar simultáneamente el amplificador a la antena y un analizador de espectro midiendo la potencia de salida del amplificador. Para esto se caracterizó el acoplador direccional y de esta forma conocer en qué medida este atenúa la señal medida. Conociendo esta atenuación se podrá contrarrestar su efecto en las mediciones para no generar errores al momento de analizar los datos obtenidos, el comportamiento del acoplador direccional se puede apreciar en la Figura 5.

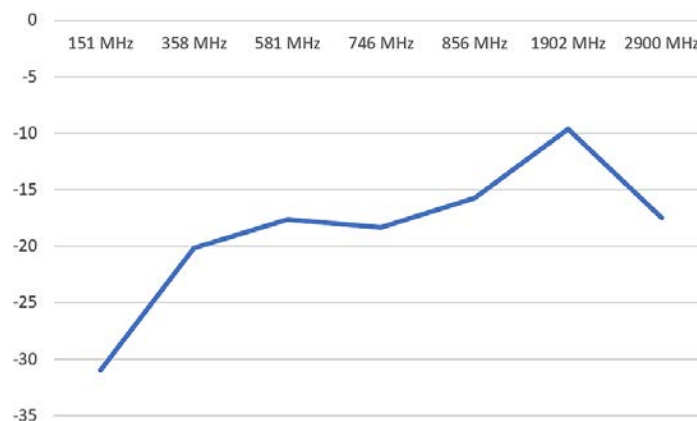


Figura 5. Atenuación en dbm del acoplador direccional

La medición de la señal recibida se realizará usando un analizador de espectro portátil, el filtro RBW y VBW se configurarán con una frecuencia de 100KHz y 10KHz, respectivamente. Lo anterior con la finalidad de quitar el ruido de la señal y poder realizar mediciones con más exactitud, además de esto se usará la función de media del analizador de espectro para descartar posibles fluctuaciones indeseadas al momento de realizar la medición.

#### 5. CONCLUSIONES

- En relación con el modelo predictivo de LOS con base en la Recomendación ITU-R P.2108-0, resulta evidente que, independientemente de la frecuencia empleada, la pérdida está asociada principalmente al tipo de clutter. En este sentido, los tipos de ocupación del suelo “Urbano denso” y “Urbano/arboleda/ bosque” son los que presentan mayor pérdida, siendo esta incluso 17 dB superior a la que se obtiene en un tipo de suelo “Espacio abierto/rural”.

- Es interesante observar que, si la altura del sistema de transmisión  $h$  es mayor o igual que la altura del obstáculo  $R$ , la frecuencia no tiene un peso significativo en el modelo de predicción de LOS a partir de la Recomendación ITU-R P.2108-0. Lo anterior evidencia la necesidad de realizar estudios de campo que permitan aseverar tal conclusión, no sin antes considerar otros modelos predictivos para esas situaciones.
- Es necesario realizar un tratamiento a las mediciones realizadas tal como lo mencionaba Chriss Hammerschmidt para evitar errores en el análisis, este tratamiento se puede hacer con un dispositivo externo como el investigador lo plantea o se puede realizar con el mismo analizador de espectro.

## REFERENCIAS

- [1] UIT (2017). P.2108: Prediction of Clutter Loss. Recomendaciones UIT-R.
- [2] UIT (2016). P.833: Atenuación debida a la vegetación. Recomendaciones UIT-R.
- [3] UIT (2012). P.1410: Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente. Recomendaciones UIT-R.
- [4] UIT (2018). P.1411: Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz. Recomendaciones UIT-R.
- [5] UIT (2018). P.311: Acquisition, presentation and analysis of data in studies of radiowave propagation
- [6] UIT (2018). P.1812: Método de predicción de la propagación específico del trayecto para servicios terrenales punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas. Recomendaciones UIT-R.
- [7] Rodríguez, I. et al. (2016). 24 GHz cmWave Radio Propagation Through Vegetation: Suburban Tree Clutter Attenuation. In 10th European Conference on Antennas and Propagation.
- [8] Hammerschmidt, C. & Johnk, R. (2016). Extracting Clutter Metrics From Mobile Propagation Measurements in the 1755-1780 MHz Band. In IEEE Military Communications Conference.
- [9] Lu, Z. & Gao, M. (2016). Simulation of Foliage Penetrating Ground Radar Range Detection. In 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics.
- [10] Hammerschmidt, C. & Johnk, R. (2017). Understanding the Impact of Terrain Databases on the Irregular Terrain Model. In IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity.

# Control de humedad relativa en invernadero agrícola mediante el autoajuste difuso controladores PI

Rafael A. Núñez<sup>1</sup>

Carlos L. Corzo<sup>2</sup>

Andrea C. González<sup>3</sup>

Unidades Tecnológicas de Santander  
Bucaramanga – Colombia

El clima en los invernaderos agrícolas presenta una respuesta dinámica con fuerte acople de variables, dado que son sistemas multivariable de fase no mínima con tiempo muerto sujeta a variación paramétrica a causa de las etapas fenológicas del cultivo y las condiciones climáticas externas medioambientales. Para mitigar el efecto de las perturbaciones se propone el diseño e implementación de un controlador proporcional integral (PI) con mecanismo de autoajuste difuso. Este esquema de control permite una buena respuesta ante variación paramétrica y cambio del punto de operación, rechazo de perturbación a la salida, estabilidad y mínimo esfuerzo en la señal de control. El diseño del controlador se contrastó con un controlador PI convencional a partir de índices de desempeño, basados en la respuesta transitoria y el error en régimen permanente, ante cambios en el punto de operación y perturbaciones de carga a la salida. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas mostraron que la respuesta dinámica del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso mejoró en 25 % el tiempo de establecimiento para el seguimiento de referencia y 38% el sobrepaso ante perturbaciones de carga, en comparación con los resultados del controlador PI convencional.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un invernadero agrícola es una construcción específica que permite monitorear y mantener las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de cultivos [1]. El clima en los invernaderos agrícolas presenta una respuesta dinámica con fuerte acople de variables, dado que son sistemas multivariable de fase no mínima con tiempo muerto [2]. De igual forma, son procesos con una fuerte variación de parámetros dado que las etapas fenológicas del cultivo y las condiciones climáticas externas afectan el punto de operación del invernadero [3].

Para el control del clima en invernaderos se han utilizado técnicas de control con diferentes enfoques orientado a estrategias no lineales dada la naturaleza del proceso [4]. La humedad relativa y la temperatura al interior de un invernadero agrícola son variables con fuerte interacción [5], lo que implica la utilización de técnicas de control multivariable basadas en redes de desacople de variables [6], control adaptativo multivariable basado en lógica *Fuzzy* con realimentación linealizada [4]. Por otra parte, para mitigar los efectos del tiempo muerto en la respuesta dinámica del clima al interior del invernadero, se han utilizado esquemas tipo predictor de Smith acoplado a redes de linealización y desacople de variables [7], control PID con mecanismo de autoajuste basado en lógica *Fuzzy* [8], [9], e incluso, técnicas de control multivariable para la humedad y temperatura con predictor de Smith filtrado [10].

Para implementar el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, se identificó el modelo matemático que describe la dinámica de la humedad relativa al interior del invernadero utilizando técnicas de identificación tipo caja negra [11] (sección 2.1), cuya respuesta permitió establecer las especificaciones de desempeño para el diseño del mecanismo de autoajuste difuso que sintoniza los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  del controlador PI [12], a partir de la *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab® (sección 2.2). El controlador fue implementado en una plataforma de 32 bits, lo que permitió realizar diferentes pruebas para validar la respuesta transitoria y análisis de rechazo de perturbación del controlador al igual que la convergencia de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  del controlador PI (sección 3). Finalmente, se plantearon conclusiones referentes al estudio realizado.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Identificación del modelo matemático

Se define un modelo matemático que relacione la variación de la humedad relativa del invernadero con el ciclo útil aplicado al convertidor DC-DC del sistema humidificador. En la Figura 7, se muestra el esquema del control PI con mecanismo de autoajuste difuso para sistemas con una entrada y una salida, *SISO* por su sigla en inglés, en el cual se modela la temperatura como una perturbación externa, dado que existe una fuerte interacción entre la humedad relativa y la temperatura al interior del invernadero [9].

En la Figura 8, se muestra una señal de excitación binaria aleatoria (RBS) y la respuesta de la humedad relativa del sistema real. La señal RBS se configuró con una amplitud en el intervalo [0.25, 0.5] del ciclo útil  $[k]$  de la señal PWM,

---

<sup>1</sup> rrodriguez@correo.uts.edu.co

<sup>2</sup> ccorzo@correo.uts.edu.co

<sup>3</sup> agonzalez@correo.uts.edu.co

aplicado al convertidor DC-DC del humidificador, con un ancho de banda  $BW = 0.00249 \text{ Hz}$ , el cual se seleccionó a partir de la respuesta de la humedad relativa ante una entrada tipo escalón  $u(t) = 0.5$  relacionada con el ciclo útil  $[k]$  de la señal PWM.

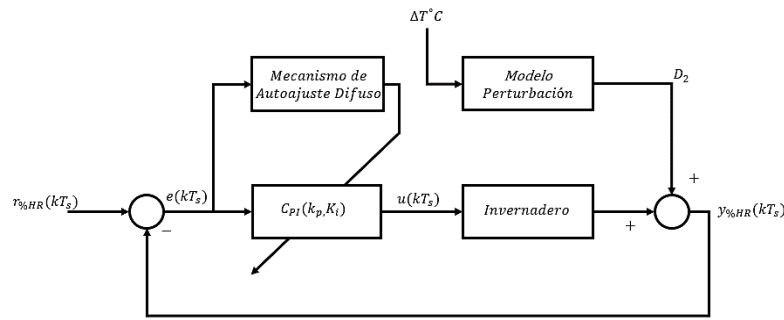


Figura 7. Esquema de control PI con mecanismo de autoajuste difuso para sistemas SISO

La frecuencia de muestreo fue  $F_s = 1 \text{ Hz}$  y el número de muestras 6000. A partir de la *ToolBox System Identification* de MATLAB® [13], se identificó el modelo matemático a partir de señales entrada-salida del sistema experimental, de manera que se obtuvo una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto con un *best fit* del 82%, tal como se muestra en la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se observa una ganancia estática  $k = 28.05$ , una constante de tiempo  $\tau = 63.99 \text{ s}$  y un tiempo muerto  $T_d = 31.14 \text{ s}$ .

$$G(s) = \frac{k}{1+\tau s} e^{-T_d s} \quad (1)$$

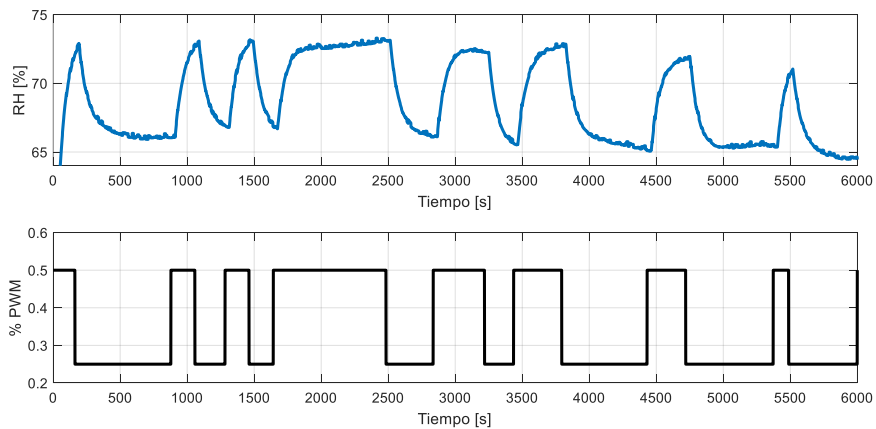


Figura 8. Señal RBS de excitación y respuesta de la humedad relativa del Sistema

En la Figura 9, se observa la validación de la respuesta del sistema identificado respecto al sistema real, con una aproximación cercana al 82%, lo que implica que el sistema identificado describe adecuadamente el comportamiento dinámico del sistema real en el punto de operación, comprendido entre el 60% y el 80% de humedad relativa al interior del invernadero.

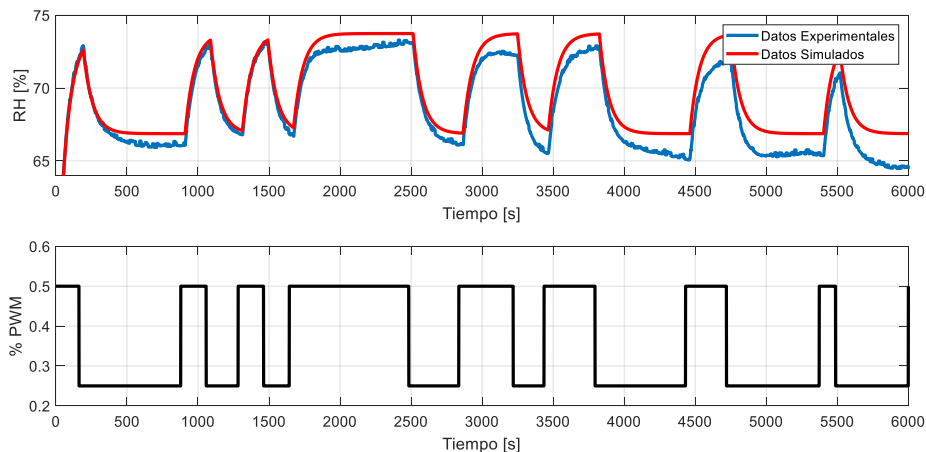


Figura 9. Respuesta de la humedad relativa del Sistema Real y Sistema Identificado

Dado que se implementó un controlador digital, fue necesario definir el periodo de muestreo  $T_s$ , factor determinante en el desempeño y estabilidad del controlador [14]. En el diagrama de Bode de la Figura 10, se estima el ancho de banda del sistema  $W_{BW} = 0.00284 \text{ Hz}$ , por tanto, se seleccionó un periodo de muestreo  $T_s = 1 \text{ s}$ . Con esta frecuencia

de muestreo, se convirtió a tiempo discreto la función de transferencia de la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, tal como se muestra en la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. La función de transferencia de la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se tomó como planta para la construcción del modelo de simulación del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso en el entorno de Simulink® de Matlab®.

$$G_d(z) = z^{-32} * \frac{0.3745 z + 0.06048}{z - 0.9845} \quad (2)$$

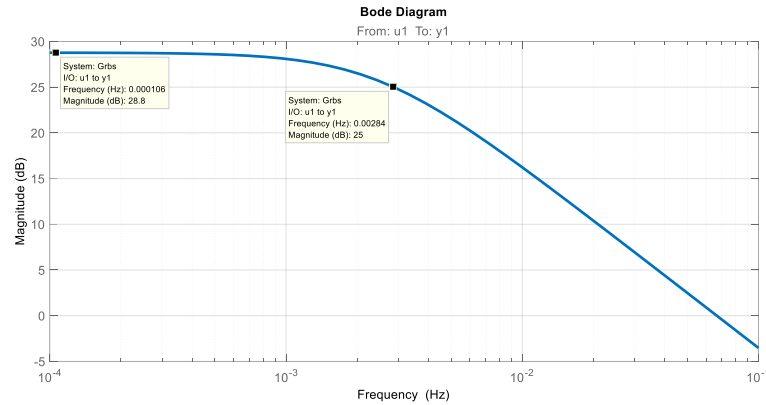


Figura 10. Diagrama de Bode del modelo identificado

## 2.2 Diseño del Controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso

La estructura del control está basado en un controlador PID acoplado a un motor de inferencia difusa que ajusta los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , del controlador a partir del error  $e$  y derivada del error  $\dot{e}$  del seguimiento de referencia [15]. En el diagrama de bloques de la Figura 7, se observa la etapa de autoajuste y la etapa del controlador PI, acoplado a la planta  $G_d(z)$  que modela la humedad relativa al interior del invernadero. La salida del sistema  $y_{\%HR}(kT_s)$  se compara con la referencia  $r_{\%HR}(kT_s)$  a partir del lazo de realimentación para generar la señal de error. Dada la dinámica lenta de la planta de humedad relativa del invernadero, no fue necesario adicionar el componente derivativo, por tanto se estableció la ganancia derivativa  $K_d = 0$ , es decir, fue suficiente mantener la componente proporcional e integral para conseguir que la humedad del invernadero sea estable con un error en régimen permanente cercano a cero [16].

El motor de inferencia difusa del mecanismo de adaptación de los parámetros del controlador PI cuenta con dos entradas, una para el error  $e$  y otra para la derivada del error  $\dot{e}$ , con un universo del discurso en el intervalo  $[-25, 25]$  para el error y  $[-1, 1]$  para la derivada del error, tal como se muestra en la Figura 11. De igual forma se definieron dos salidas tipo *Singleton*, una salida para el ajuste de la constante proporcional  $\Delta K_p$  y otra para el ajuste de la constante integral  $\Delta K_i$ . Se utilizó salidas tipo *Singleton* con un sistema de inferencia difusa tipo Takagui-Sugeno, dado que presenta un mejor rendimiento en cuanto a coste computacional y rápida implementación en la plataforma de 32 bits [17]. Para las entradas se asumieron 5 variables lingüísticas representadas a partir de conjuntos triangulares, tal como se muestra en la Figura 11, definidas como Negativo Grande (NB), Negativo (N), cero (ZE), Positivo (P) y Positivo Grande (PB). Para las salidas, 5 niveles tipo singleton son definidos como Pequeño ( $S = 0$ ), Medio-Pequeño ( $MS = 0.25$ ), Medio ( $M = 0.5$ ), Medio-Grande ( $MB = 0.75$ ) y Grande ( $B = 1$ ).

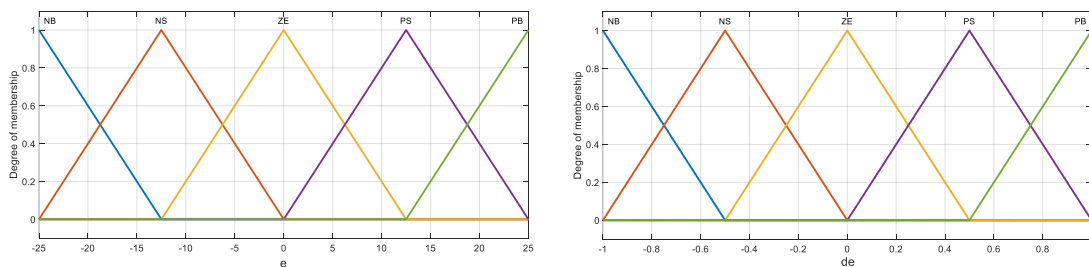


Figura 11. Conjuntos variables lingüística de entrada

La base de reglas del motor de inferencia difusa se muestra en la Tabla 18. Las reglas difusa han sido diseñadas con base en la experiencia orientada a la técnica de sintonización Ziegler-Nichols, lo que permite implementar un mecanismo de sintonización en tiempo real basado en lógica *Fuzzy* para el controlador PI [18].

Tabla 18. Base de reglas mecanismo ajuste de la constante proporcional  $\Delta K_p$  y constante integral  $\Delta K_i$

		Parámetro $\Delta K_p$					Parámetro $\Delta K_i$				
$\dot{e}$	$e$	NB	N	ZE	P	PB	NB	N	ZE	P	PB
NB		B	B	B	B	B	NB	M	M	M	M
N		MB	MB	MB	MB	MB	N	MS	MS	MS	MS

Parámetro $\Delta K_p$						Parámetro $\Delta K_i$					
$e$	NB	N	ZE	P	PB	$e$	NB	N	ZE	P	PB
ZE	S	S	MS	MS	MS	ZE	MS	MS	S	MS	MS
P	MB	MB	MB	M	M	P	MS	MS	MS	MS	MS
PB	B	B	B	B	B	PB	M	M	M	M	M

Para normalizar y garantizar la convergencia de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$ , se define un intervalo de solución factible  $[K_{p_{min}}, K_{p_{max}}]$  y  $[K_{i_{min}}, K_{i_{max}}]$ , a partir del cual se calculan las ganancias del controlador PI con base en la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [15].

$$K_p = \Delta K_p (K_{p_{max}} - K_{p_{min}}) + K_{p_{min}} \quad (3)$$

$$K_i = \Delta K_i (K_{i_{max}} - K_{i_{min}}) + K_{i_{min}} \quad (4)$$

Otro enfoque permite sintonizar los parámetros del controlador a partir de las salidas del motor de inferencia difusa y un valor inicial de convergencia para el ajuste de la ganancia proporcional  $K_{p_0}$  y el ajuste de la ganancia integral  $K_{i_0}$  de acuerdo a la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [19].

$$K_p = K_{p_0} + \Delta K_p \quad (5)$$

$$K_i = K_{i_0} + \Delta K_i \quad (6)$$

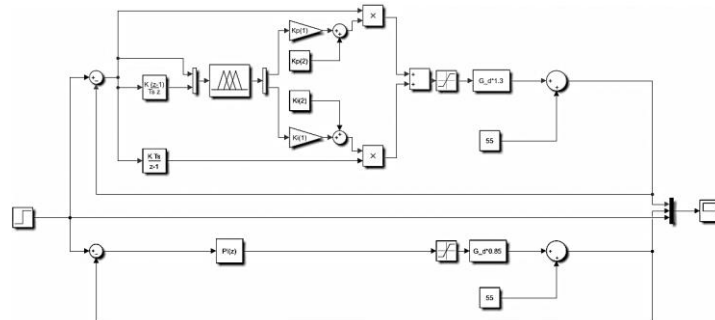
En este caso se definió un intervalo de solución factible para la ganancia proporcional  $K_p \in [0.03, 0.05]$  y para la ganancia integral  $K_i \in [0.00061, 0.00072]$ , lo cual define la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Estos valores se seleccionaron con base en la sintonización de un controlador PI convencional que presentó buenos índices de desempeño en cuanto a la respuesta transitoria.

$$K_p = 0.02\Delta K_p + 0.03 \quad (7)$$

$$K_i = 0.00011\Delta K_i + 0.00061 \quad (8)$$

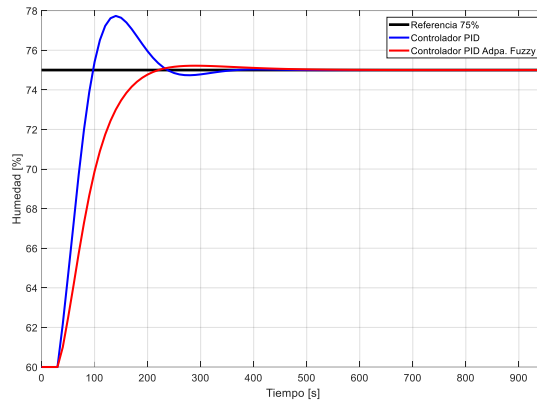
### 2.3 Modelo del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso

A partir de la base de reglas se diseña el motor de inferencia difusa acoplado a las entradas para el error y las salidas para el ajuste de los parámetros del controlador, en la *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab®. En el entorno de programación gráfica de Simulink® de Matlab® se construye el modelo de simulación del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso acoplado a la planta identificada en tiempo discreto  $G_d(z)$ , tal como se muestra en la Figura 12. A partir del modelo de simulación se realizaron múltiples pruebas para analizar el desempeño del controlador con base en la respuesta de un controlador PI convencional discreto. Se realizaron pruebas con una señal de referencia de humedad relativa del 75% con una humedad ambiente de 55%, en la cual se determinó el tiempo de establecimiento, sobrepaso, error en estado estable, esfuerzo en la señal de control y convergencia de los parámetros del controlador.



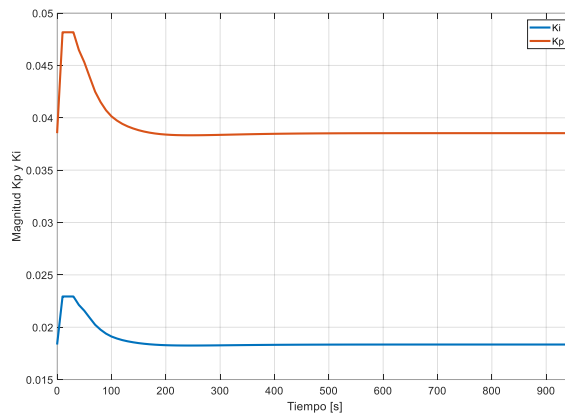
**Figura 12.** Modelo del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y PI convencional

En la Figura 13, se observa la comparativa de la respuesta entre controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y PI convencional ante una referencia del 75% de humedad relativa. Las dos pruebas muestran un tiempo de establecimiento cercano a 400 s y un sobrepaso para el controlador con mecanismo de autoajuste difuso cercano al 0.01%, mientras que el PI convencional tiene un sobrepaso del 4%.



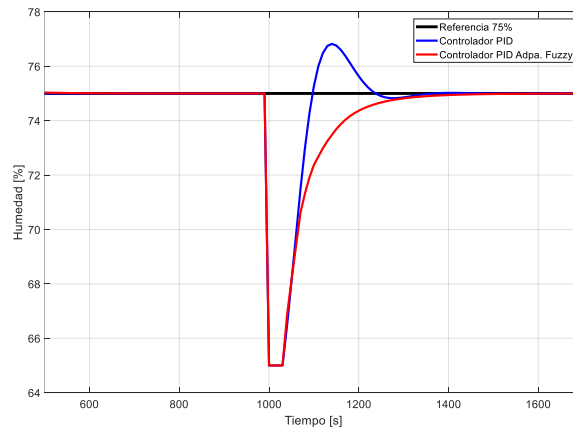
**Figura 13.** Comparativa Controlador PID adaptativo Fuzzy y PID Convencional

En la Figura 14, se observa la convergencia de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  con base en las reglas del motor de inferencia difusa. A medida que avanza el tiempo, el motor de inferencia difusa ajusta los valores de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  hasta que converge en un valor constante cuando el error tiende a cero en estado estable.



**Figura 14.** Convergencia de parámetros  $K_p$  y  $K_i$

Se realizaron pruebas de perturbación y variación paramétrica del sistema que permitieron analizar la respuesta transitoria. Se aplicó una perturbación de humedad relativa del 10% a la salida del sistema cuya respuesta se muestra en la Figura 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual la salida del sistema se redujo al 50% de humedad relativa, además se observa que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso compensó la perturbación con un amortiguamiento más alto respecto al controlador PI convencional.

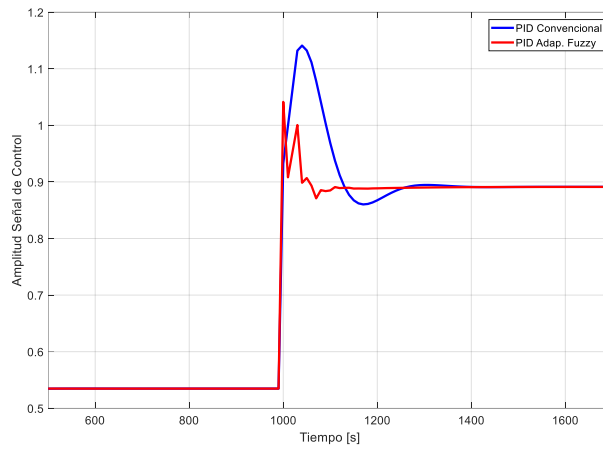


**Figura 15.** Respuesta del controlador ante una perturbación de carga de -10%

En la Figura 16, se observa el esfuerzo la señal de control para el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y el controlador PI convencional. Se pudo demostrar que ante una perturbación de carga del 10% a la salida del sistema, la estrategia de control PI con mecanismo de autoajuste difuso tiene mejor desempeño en cuanto a tiempo de establecimiento y esfuerzo de la señal de control. Éste esfuerzo se relaciona con la suavidad con que cambia la señal en el tiempo. Una medida para estimar la variación total de la señal de control  $TV_u$  equivalente a la suavidad [20], está dada a partir de la Ecuación **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

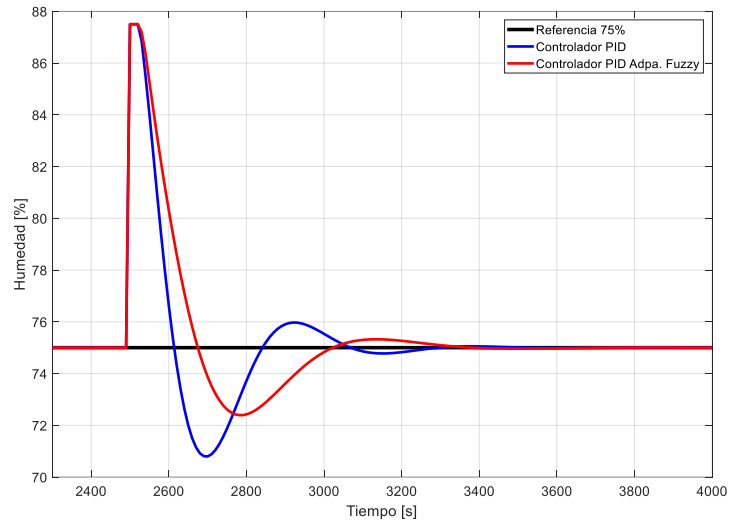
$$TV_u = \sum_{k=1}^{\infty} |u_{k-1} - u_k| \quad (9)$$





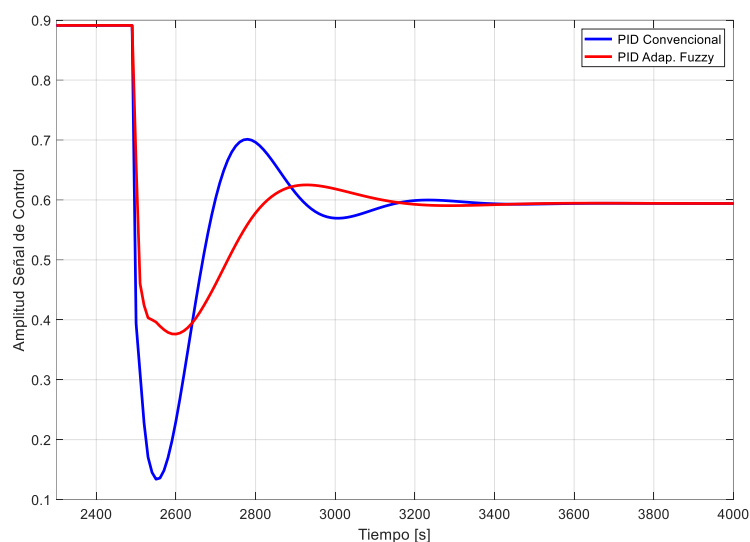
**Figura 16.** Esfuerzo de señal de control ante perturbación de carga de -10%

En la Figura 17 se observa el resultado de la simulación de la respuesta del controlador PI convencional comparada con el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, cuando se aplicó una variación paramétrica al sistema equivalente a una variación del 30% de la constante de tiempo y ganancia estática. El valor final del sistema pasó del 75% a un 88% durante esta variación, lo que permitió observar que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso estabilizó el sistema de una forma más rápida con un mayor amortiguamiento.



**Figura 17.** Respuesta del controlador ante una variación paramétrica

En la Figura 18 se muestra la señal de esfuerzo del controlador PI convencional comparada con la señal del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, cuando se le aplicó una variación paramétrica al sistema, donde se observa que el controlador hace un menor esfuerzo de la señal de control, por tanto muestra un mejor desempeño.

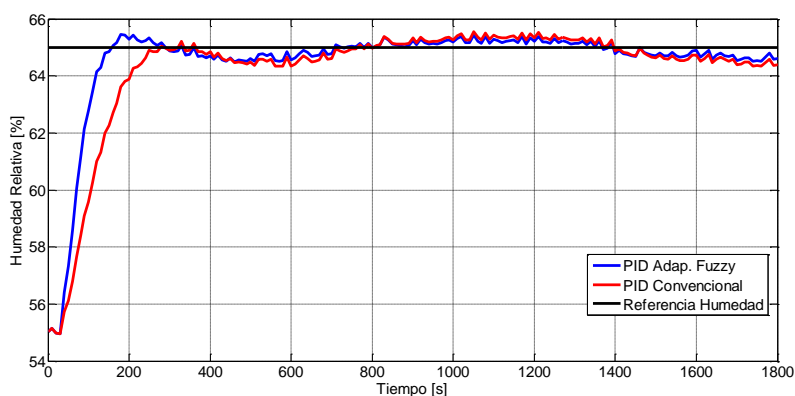


**Figura 18.** Esfuerzo de señal de control ante una variación paramétrica

### 3. RESULTADOS

El algoritmo de control diseñado se implementó en una plataforma de 32 bits encargada de generar una señal PWM de 1 KHz aplicado a un convertidor DC-DC del sistema humidificador. La humedad relativa al interior del invernadero es medida a una tasa de 1 Hz a partir de un sensor de humedad relativa tipo capacitivo [21]. Este lazo de realimentación permitió realizar pruebas experimentales en diferentes puntos de consigna del controlador al igual que pruebas de rechazo de perturbación de carga a la salida del sistema de humedad.

En la Figura 19, se observa la comparativa de la respuesta del sistema real con el controlador PI convencional y el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso. La respuesta del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso muestra una respuesta más rápida respecto a la respuesta del controlador PI convencional, lo que corresponde a un tiempo de establecimiento cercano a los 300 s y 400 s respectivamente. El controlador PI convencional presenta un sobrepaso de aproximadamente el doble del sobrepaso del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, para una referencia del 65% cuando el valor de la humedad ambiente está cercano al 55%. El error en estado estable para el controlador PI convencional presenta un valor cercano al 1.5%, mientras que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso es del 1%. No obstante, se observa que las perturbaciones externas afectan el error en estado estable. En la Tabla 19 se observan los resultados de los índices de desempeño.



**Figura 19.** Respuesta del sistema ante una referencia del 65% de Humedad

**Tabla 19.** Índices de desempeño respecto para una referencia del 65%

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	0.1%	400 s	1.5 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	0.05%	300 s	1%

En la Figura 20, se observa la respuesta del controlador PI convencional respecto al controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso ante una perturbación de carga cuando se inyecta humedad al sistema a partir de un humidificador externo. Se muestra en la gráfica que ambos controladores intentan compensar la perturbación. En el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso la humedad interna no supera los 75%, a comparación con el PI convencional donde la humedad interna llega a un valor cercano del 87%. El tiempo de establecimiento para el PI con mecanismo de autoajuste difuso es mucho más corto, con un tiempo de 750 s comparado con el tiempo que presenta el PI convencional, el cual está alrededor de los 1050 s. El error en estado estable para el PI con mecanismo de autoajuste

difuso es 10 veces más pequeño que el error en estado estable del controlador PI convencional. Se observa que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso tuvo un mejor desempeño en cuanto al sobrepaso y tiempo de establecimiento respecto al controlador PI convencional. En la Tabla 20, se observan los resultados de los índices de desempeño.

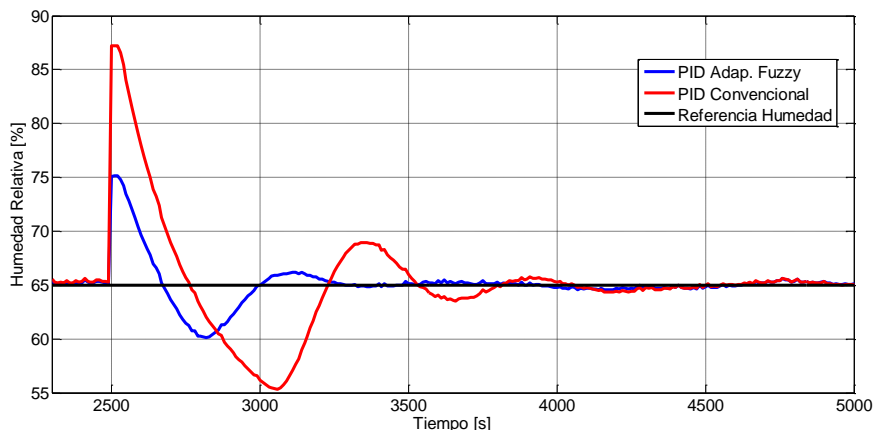


Figura 20. Perturbación de carga

Tabla 20. Índices de desempeño prueba de perturbación de carga

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	33%	1050 s	1 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	15%	750 s	0.1%

Para realizar pruebas en diferentes puntos de operación, se realizó un cambio de referencia del 65% al 83% a los 6000 s, tal como lo muestra la Figura 21. Se observa que el controlador PI convencional tiene un sobrepaso del 10% mientras que el PI con mecanismo de autoajuste difuso tiene un sobrepaso del 4% para el mismo cambio de referencia. Por otra parte, el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso se estabiliza más rápido con un tiempo de establecimiento cercano a 1000 s comparado con el controlador PI convencional que se estabiliza alrededor de 1600 s. En contraste, se observa que el PI convencional presenta una oscilación respecto al punto de consigna, mientras que el PI con mecanismo de autoajuste mantiene el seguimiento de la referencia con un error cercano a cero. En la Tabla 21 se observan los resultados de los índices de desempeño.

Tabla 21. Índices de desempeño cambio de referencia

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	10%	1600 s	1 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	4%	1000 s	0.3%

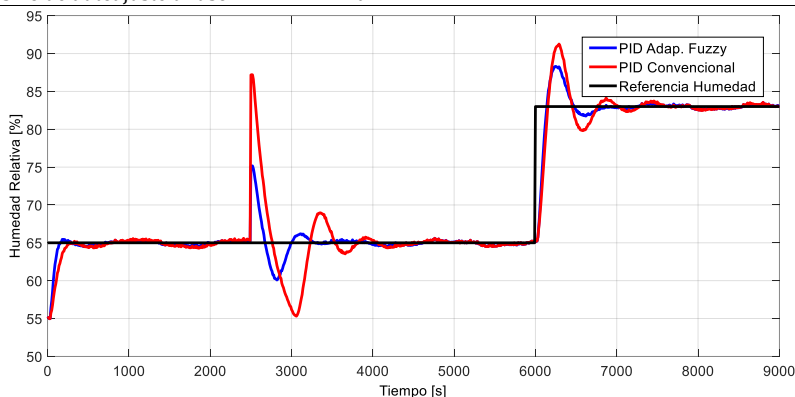
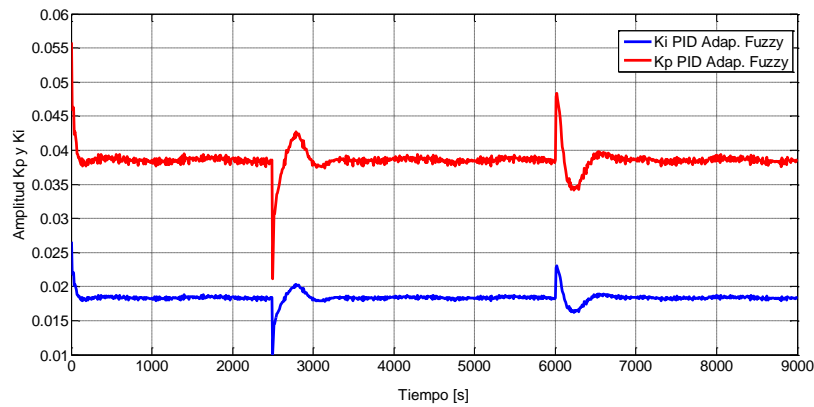


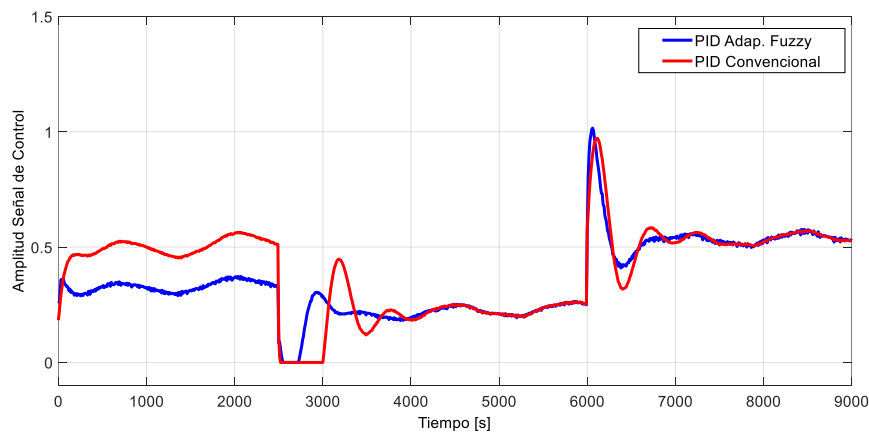
Figura 21. Cambio de Referencia del 65% al 83%

En la Figura 22, se observa la variación de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  durante las pruebas de perturbación y pruebas de cambio de punto de operación. Se observa la convergencia de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, lo que permite inferir que el motor de inferencia difusa funciona adecuadamente y es capaz de ajustar los parámetros del controlador de forma automática teniendo en cuenta la respuesta transitoria del sistema.



**Figura 22** Convergencia Parámetros  $K_p$  y  $K_i$

En la Figura se muestra cómo evoluciona la señal de control para las tres pruebas que se llevaron a cabo. La primera parte a partir de la prueba de referencia 65%, el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, tiene una acción de control menos agresiva respecto a la acción de control que genera el controlador PI convencional, dado que tiene una mayor amplitud. La segunda parte a partir de la perturbación externa a los 2500 s, la señal del sistema PI convencional se satura durante 500 s, mientras que la señal del controlador PI con mecanismo de autoajuste presenta una saturación durante un tiempo cercano a los 200 s, lo cual indica un mejor índice de desempeño, dado que presenta un mejor tiempo de establecimiento y error en estado estable cercano a cero respecto al controlador PI convencional. El controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, presenta una señal algo mayor que 1, lo cual satura el actuador, no obstante, la señal de control se estabiliza rápidamente y presenta una baja oscilación respecto a la presentada por la señal de control del controlador PI convencional. En este contexto, la señal de control el PI con mecanismo de autoajuste difuso presenta un menor esfuerzo en cuanto a la acción del humidificador, lo que reduce considerablemente el esfuerzo del mismo.



**Figura 17.** Esfuerzo de la señal de control

#### 4. CONCLUSIONES

El mecanismo de adaptación basado en lógica *Fuzzy* permitió construir un controlador PI adaptativo con un mecanismo de autoajuste, el cual modifica las constantes  $K_p$  y  $K_i$  en función del error y derivada del error de seguimiento de referencia. Se pudo demostrar que este mecanismo de adaptación permite reajustar el controlador ante cambio de puntos de operación, perturbaciones externas y variación paramétrica del sistema, mostrando un mejor desempeño en cuanto a la respuesta transitoria y esfuerzo de la señal de control en relación con un controlador PI convencional.

Ante diferentes puntos de operación, y pruebas de perturbación externa, se pudo demostrar que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso muestra un mejor desempeño y menor esfuerzo de la señal de control respecto a un PI convencional, dado que presenta menor tiempo de establecimiento, un sobrepaso mínimo, con un error en estado estable cercano a cero y una rápida convergencia de los parámetros del controlador. De igual forma se pudo demostrar que el mecanismo de adaptación basado en lógica *Fuzzy* con un sistema difuso del tipo Takagi-Sugeno con salidas tipo *Singleton* permite una rápida programación del algoritmo en una plataforma de 32 bits con un coste computacional mínimo.

## REFERENCIAS

- [1] Rodríguez, F. et al. (2015). Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth. Cham. Springer.
- [2] Su, Y., Xu, L. & Goodman, E. (2017). Greenhouse climate fuzzy adaptive control considering energy saving. *Int. J. Control Autom. Syst.* 15(4), 1936-1948.
- [3] Revathi, S., Radhakrishnan, T. & Sivakumaran, N. (2017). Climate control in greenhouse using intelligent control algorithms. In American Control Conference.
- [4] Su, Y., Xu, L. & Li, D., (2016). Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear System with Actuator Saturation for Greenhouse Climate Control Problem. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 13(2), 772-788.
- [5] Outanoute, M. et al. (2015). A neural network dynamic model for temperature and relative humidity control under greenhouse. In Third International Workshop on RFID and Adaptive Wireless Sensor Networks.
- [6] Azaza, M. et al. (2015). Fuzzy Decoupling Control of Greenhouse Climate. *Arab. J. Sci. Eng.* 40(9), 2805-2812.
- [7] Gurban, E. & Andreescu, G. (2014). Comparison of modified Smith predictor and PID controller tuned by genetic algorithms for greenhouse climate control. In 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics.
- [8] Khodadadi, H. & Dehghani, A. (2016). Fuzzy logic self-tuning PID controller design based on smith predictor for heating system. In 16th International Conference on Control, Automation and Systems.
- [9] Goadria, F., Sbita, L. & Sigrimis, N. (2017). Comparison between self-tuning fuzzy PID and classic PID controllers for greenhouse system. In International Conference on Green Energy Conversion Systems.
- [10] Giraldo, S., Flesch, R. & Normey-Rico, J. (2016). Multivariable Greenhouse Control Using the Filtered Smith Predictor. *J. Control Autom. Electr. Syst.* 27(4), 349-358.
- [11] Tangirala, A. (2015). Principles of system identification: Theory and practice. Taylor & Francis Group.
- [12] de Maity, R. & Mudi, R. (2014). Fuzzy Self-tuning of Conventional PID Controller for High-Order Processes. In International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications.
- [13] Garnier, H. (2015). Direct continuous-time approaches to system identification. Overview and benefits for practical applications. *Eur. J. Control* 24, 50-62.
- [14] Kocur, M., Kozak, S. & Dvorscak, B. (2014). Design and Implementation of FPGA - digital based PID controller. In 15th International Carpathian Control Conference.
- [15] Jiang, W. & Jiang, X. (2012). Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-Tuning PID. *Procedia Eng.* 43, 307-311.
- [16] Yamaguchi, T., Hirata, M. & Pang, C. (2017). High-speed precision motion control. CRC Press.
- [17] Zaki, A. et al. (2018). Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control. *Ain Shams Eng. J.* 9(1), 65-75.
- [18] He, S. et al. (1993). Fuzzy self-tuning of PID controllers. *Fuzzy Sets Syst.* 56(1), 37-46.
- [19] Nuchkrua, T. & Leephakpreeda, T. (2013). Fuzzy Self-Tuning PID Control of Hydrogen-Driven Pneumatic Artificial Muscle Actuator. *J. Bionic Eng.* 10(3), 329-340.
- [20] Alfaro, V. & Vilanova, R. (2016). Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers. Springer.
- [21] Hassanzadeh, A., Borghei, A. & Lindquist, R. (2008). Relative humidity measurement using capacitive sensors. In SoutheastCon.

Víctor Miramá<sup>1</sup>  
Claudia Hernández<sup>2</sup>  
Pablo Jojoa<sup>3</sup>  
Universidad del Cauca  
Popayán – Colombia

El análisis de sistemas de comunicaciones por radio reales implica tener un conjunto de elementos que permitan la visualización de los fenómenos asociados a una transmisión por radio, estos elementos generalmente son de alto costo, por lo tanto, no están siempre disponibles para la experimentación en Instituciones de Educación Superior (IES). Debido a esto, últimamente se están utilizando plataformas y dispositivos basados en hardware reconfigurable y radio definido por software, que permiten implementar a bajo costo diversos sistemas de comunicaciones por radio, analizando su desempeño ante un canal de comunicaciones real, con todos sus efectos, como interferencia, ruido y limitación de ancho de banda. En este capítulo se presenta el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones que emplea codificación convolucional basado en un dispositivo de radio definido por software, para ello se compara su desempeño frente a un sistema sin codificación, se realizan diferentes pruebas del sistema variando la distancia de separación entre transmisor y receptor, y el tipo de canal. El sistema implementado presenta buen desempeño ante distancias cortas, y permite analizar los efectos del canal de transmisión ante diferentes configuraciones. Se evidencia la importancia de la codificación en la transmisión de la señal y la necesidad del sincronismo para trabajar con este tipo de dispositivos.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la investigación y estudio de sistemas de comunicaciones, la mayoría de los resultados obtenidos se analizan mediante simulación y bajo conceptos matemáticos que pretenden una aproximación a la realidad del fenómeno. Sin embargo, los resultados alcanzados se alejan de la realidad porque se basan en aproximaciones necesarias para la implementación, por lo tanto, se hace necesario buscar estrategias y herramientas que permitan llevar los resultados teóricos a una implementación práctica. Como parte de esta iniciativa, en los grupos de investigación GRIAL (Grupo de Radio e InALámbricas) y GNTT (Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones) de la Universidad del Cauca, adscritos a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), se propuso la implementación de un sistema prototipo de comunicación de datos basado en hardware reconfigurable, que permita evaluar técnicas de codificación de fuente, de línea y de canal; técnicas de modulación, técnicas de transmisión y que a su vez pueda ser adaptable a sistemas de comunicación inalámbricos.

Como primera etapa del proyecto se implementaron técnicas de modulación sobre tarjetas FPGA (Field Programmable Gate Array), pero procurando mantener el estudio actualizado, se migraron los resultados hacia Dispositivos de Radio Definido por Software USRP (Universal Software Radio Peripheral), que permitieran trabajar con un canal real de comunicaciones. En este capítulo se presentan los resultados de la implementación de modulación QPSK y codificación convolucional en un sistema de comunicaciones basado en USRP, evidenciando la diferencia del trabajo con entornos reales, donde se hace necesario tener en cuenta procesos de sincronización para la recepción de señales. El resto del capítulo se estructura de tal manera que el lector recuerde los conceptos fundamentales para posteriormente describir el diseño implementado, las pruebas realizadas y los resultados del desarrollo del proyecto.

## 2. CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL

Los códigos convolucionales son una clase de códigos que reciben la información a codificar de forma serial, se considera un tipo de codificación casi intuitivo y dada esta característica se implementan en diferentes sistemas de comunicaciones móviles actuales, así como en sistemas satelitales. A diferencia de los códigos bloque, los códigos convolucionales no envían el mensaje de forma sistemática, tan solo es necesario enviar los bits de código, el modo de funcionamiento de estos codificadores se basa en una ventana de observación de la entrada para generar los  $r$  bits de código necesarios. El tamaño de la ventana de observación se denomina tamaño de restricción, que relaciona los bits de entrada que influyen en el cálculo de los bits de código, esta ventana tiene un corrimiento de un bit [1-4].

Para un codificador que genera  $r$  bits con la ventana de observación que desplaza un bit a la vez, se dice que la tasa de codificación es  $1/r$ , cuanto mayor sea la cantidad de bits de la palabra de código mayor será la resistencia a errores de bit, pero se invertirá una gran cantidad de ancho de banda en la redundancia de codificación. En la práctica se utiliza el menor valor de  $r$  y de tamaño de restricción posible tal que proporcione una tasa de error de bit aceptable. El codificador convolucional tiene en cuenta  $K$  bits de entrada para generar  $r$  bits de salida de acuerdo a unas funciones establecidas que relacionan los  $K$  bits de la entrada tomados como subconjuntos [1, 5]. Para la representación de un código convolucional existen diferentes maneras, a continuación, se relacionan algunas de ellas.

---

<sup>1</sup> vmirama@unicauca.edu.co

<sup>2</sup> claudiah@unicauca.edu.co

<sup>3</sup> pjojoa@unicauca.edu.co

## 2.1 Diagrama de Bloques

Dado que los códigos convolucionales pueden ser vistos como registros de corrimiento, es posible representarlos mediante diagramas de bloque, por ejemplo, para un codificador convolucional con tasa de codificación  $\frac{1}{2}$ , su diagrama de bloques se muestra en la Figura 1.

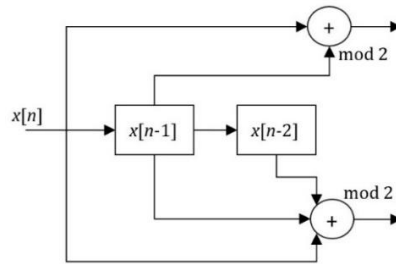


Figura 23. Diagrama de Bloques codificador convolucional

## 2.2 Máquina de estados

Para la representación de un código convolucional mediante máquinas de estados se debe tener en cuenta el tamaño de restricción, dado que el número de estados será igual a  $2K-1$ . En la Figura 2 se muestra la máquina de estados correspondiente al ejemplo del codificador convolucional de tasa  $\frac{1}{2}$ . La construcción de dicho diagrama relaciona las entradas con las salidas previas y los bits de paridad generados, teniendo en cuenta los polinomios generadores de código o el diagrama de bloques [5].

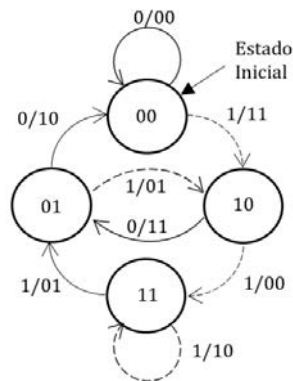


Figura 24. Máquina de estados codificador  $\frac{1}{2}$

En el diagrama del ejemplo se puede notar que, en el punto de inicio como en el caso del diagrama de bloques, se tiene almacenado un 00 dado que no existen entradas previas, posteriormente si la entrada es un 0, los bits de código generados son 00, de aquí que la transición se marque como 0/00 ( $x[n]/p_0p_1$ ), y el estado de los registros es 00. Por el contrario, si la entrada es un 1, los bits de código generados son 11, y los registros sufren un corrimiento a 10, este análisis se sigue hasta encontrar todas las posibles transiciones.

## 3. TARJETAS USRP

Las tarjetas USRP son dispositivos de bajo costo que trabajan en conjunto con un computador a través de una FPGA para la implementación de Radio Definido por Software (SDR, Software Defined Radio). Este periférico realiza las funciones de trasladar la señal banda base de Radio Frecuencia (RF, Radio Frequency), a través de una sección de Frecuencia Intermedia (IF, Intermediate Frequency) y viceversa. Es un diseño totalmente libre que utiliza como software Radio GNU.

En Radio GNU, el código para el procesamiento de la señal está escrito en C++, utilizando herramientas de software libre como la Colección de Compiladores de GNU (GCC, GNU Compiler Collection). El control y la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, Graphical User Interface) están escritos en código Python, que también es software libre. Al igual que el Firmware para el controlador USB está escrito en C y se compila con el Compilador C de Dispositivos Pequeños (SDCC, Small Device C Compiler). El código de la FPGA del USRP está escrito en Verilog, este se puede combinar con el Lenguaje de Descripción Hardware para un Circuito Integrado de Muy Alta Velocidad (VHSIC, Very High Speed Integrated Circuit) (VHDL, VHSIC Hardware Description Language) si se desea. El software libre de Altera, Quartus II se utiliza para la síntesis del código [6, 7].

Para este proyecto se utilizaron las tarjetas USRP B210, las cuales cuentan con siete puertos periféricos, de los cuales cuatro son para transmitir y recibir información, un puerto opcional para una antena del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, Global Positioning System), la cual puede ser utilizada para sincronismo del reloj interno de la FPGA Spartan Xilinx 6XC6SLX150, un puerto Bus Serie Universal (USB, Universal Serial Bus) para comunicarse con el computador y un conector de Corriente Continua (DC, Direct Current) para alimentación, si la energía proporcionada

por el puerto USB es insuficiente. La FPGA es la encargada de recibir la información digital del computador y pasarla a frecuencia intermedia en el proceso de transmisión y el proceso contrario en recepción, además simultáneamente está enviando información a la plataforma SDR. En la tabla 1 se presentan las características técnicas de la tarjeta USRP® B210. Este dispositivo tiene la capacidad de transmitir y recibir información de señales como FM, TV, Celular, Wifi [4], entre otras, en un rango de frecuencias de 70 MHz a 6 GHz, adicionalmente cuenta con dos canales full dúplex y compatibilidad con MIMO 2X2. (Tabla 1).

**Tabla 22.** Características de la tarjeta USRP

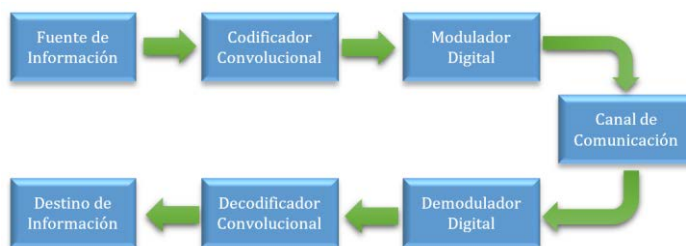
Especificaciones Técnicas	Valor
Alimentación DC	6 V
Frecuencia de muestreo DAC - ADC	61.11 MS/seg
Resolución DAC - ADC	12 Bits
Potencia de Salida	>10 dBm
Figura de Ruido en Receptor	<8 dB
Canales Full Duplex	2
Frecuencia RF	70 MHz – 6 GHz
Frecuencia de Reloj	100 MHz

La USRP® B210, es compatible con el Controlador de Hardware USRP® (UHD, USRP® Hardware Driver), un driver que permite al dispositivo interactuar con plataformas SDR desarrolladas para Matlab® y GNU Radio, lo cual brinda flexibilidad en el diseño y la posibilidad de realizar cambios en tiempo real. Contiene el circuito integrado AD9361, el cual posee cuatro conversores analógico-digitaes, con una resolución de doce bits para cuantificar una muestra y capacidad de capturar 61.11 millones de muestras (símbolos) por segundo, con lo cual es posible muestrear una señal con un ancho de banda máximo de 30.55 MHz, el límite impuesto por el ancho de banda de Nyquist.

#### 4. SISTEMA DE COMUNICACIONES

##### 4.1 Modelo del sistema

Para el análisis de la implementación de la codificación convolucional en un sistema de comunicaciones es necesario definir un modelo de implementación, se propone el modelo de la Figura 3, donde se relacionan los elementos principales para la transmisión de señales.



**Figura 25.** Modelo del Sistema

El modelo está conformado por una fuente de información, que suministra las entradas al codificador convolucional para que posteriormente sean moduladas y adecuadas al canal de comunicaciones empleando dispositivos de Radio Frecuencia. En la recepción, se tiene un dispositivo de Radio frecuencia encargado de recuperar la señal del medio de transmisión, entregarla al demodulador y posteriormente al decodificador convolucional para recuperar la información enviada. Este modelo de comunicación es la base de la implementación, puesto que el proceso de transmisión involucra el desarrollo de cada uno de estos elementos a excepción del Canal de Comunicación el cual será el entorno real.

##### 4.2 Simulación del Modelo

Para la simulación del sistema de comunicaciones se considera un sistema inicial que permita comprobar de manera controlada el efecto de la codificación, su implementación en Simulink se presenta en las Figuras 4 y 5. La Figura 4 muestra un sistema de transmisión que envía los datos generados por la fuente de información empleando modulación QPSK sin codificación de canal, el canal está constituido por el bloque AWGN que adiciona ruido blanco gaussiano a la señal transmitida, finalmente recibida por el bloque demodulador. Los elementos restantes son utilizados para observar la señal transmitida y calcular los errores en la transmisión. La figura 5 considera la codificación y decodificación convolucional para hacer un análisis comparativo del desempeño del sistema de comunicaciones.

El bloque Calculador de Error junto a la herramienta bertool de Matlab, permiten obtener las curvas de desempeño de la Figura 6, en la cual se pueden notar las ventajas de la inclusión de la codificación en el sistema de comunicaciones, dado que con la misma energía de bit ( $E_b/N_0$ ) se pueden obtener menos errores en la transmisión de información, o manteniendo la misma tasa de error, se puede ahorrar en el consumo de potencia, dado que se requiere un menor valor de ( $E_b/N_0$ ).



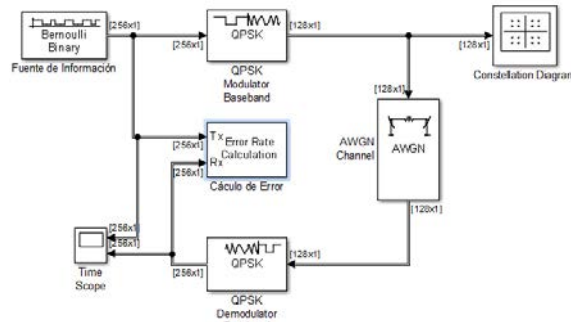


Figura 26. Sistema base sin codificación

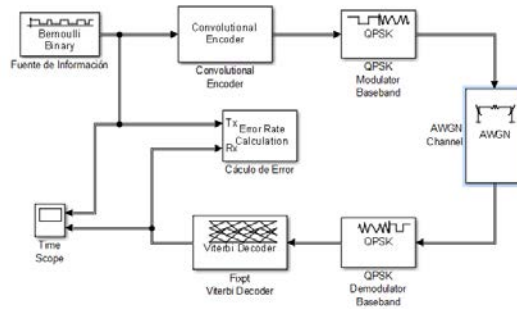


Figura 27. Sistema con codificación convolucional

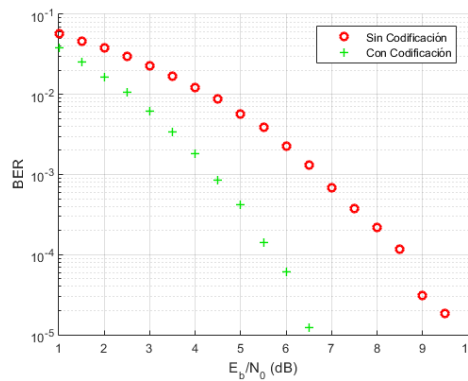


Figura 28. Desempeño sistema con y sin codificación convolucional

## 5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Establecido el análisis, se procede con la implementación del sistema utilizando tarjetas USRP, se emplea Simulink y se adiciona un conformador de pulso para la etapa de transmisión y el bloque SDRu Transmitter; para la etapa de recepción el bloque SDRu Receiver. El transmisor y el receptor pueden operar en diferentes equipos de cómputo, sintonizados a la frecuencia 2.4GHz; el procesamiento de señal se lleva a cabo en el computador y la interfaz de transmisión la proporciona la tarjeta USRP, de esta manera la implementación inicial del sistema se muestra en las Figuras 7 y 8.

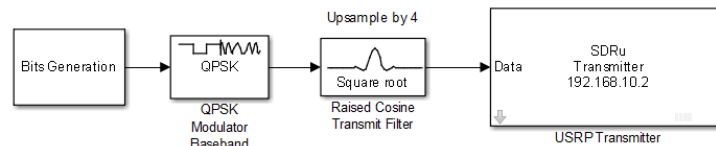


Figura 29. Sistema transmisor con USRP

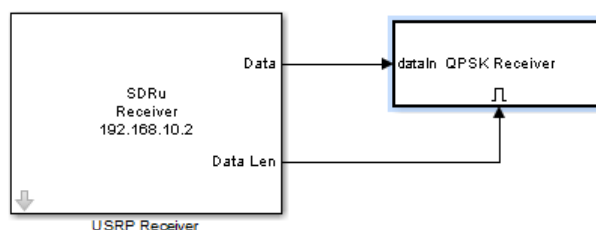


Figura 30. Sistema receptor con USRP

En el bloque Bits Generation de la Figura 7, se realizan los procesos de codificación y entrelazado, empleados para mejorar la transmisión de señal, estos datos juntos a una secuencia de sincronización se modulan empleando la técnica QPSK. En el receptor, se desarrollan todos los procesos necesarios para sincronización y detección de la señal transmitida, se realiza la decodificación y demodulación, estos procesos están incluidos del bloque QPSK Receiver.

## 6. PRUEBAS

Para las pruebas, en primera instancia se implementa el sistema sin incluir la codificación y se conectan las tarjetas USRP mediante un cable coaxial para excluir el efecto del canal, como se muestra en la Figura 9, se transmite el texto "Hello World" y se obtiene la constelación de transmisión y recepción presentadas en la Figura 10.



Figura 31. Montaje con cable directo

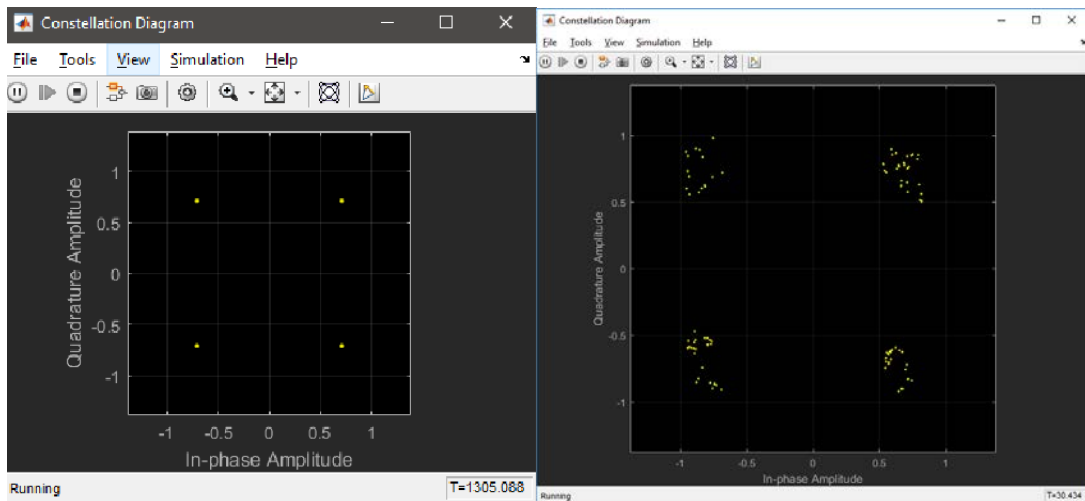


Figura 32. Constelación transmitida y recibida

Se puede notar que el canal induce ruido en la transmisión, pero la recepción se lleva a cabo sin inconvenientes, permitiendo que no existan alteraciones en la constelación. La Figura 11 muestra que el mensaje transmitido se recibe sin inconvenientes, sin embargo, debido a la complejidad de la sincronización en ciertos instantes de tiempo el receptor comete errores en el proceso de detección, como se puede evidenciar en la Figura 12.

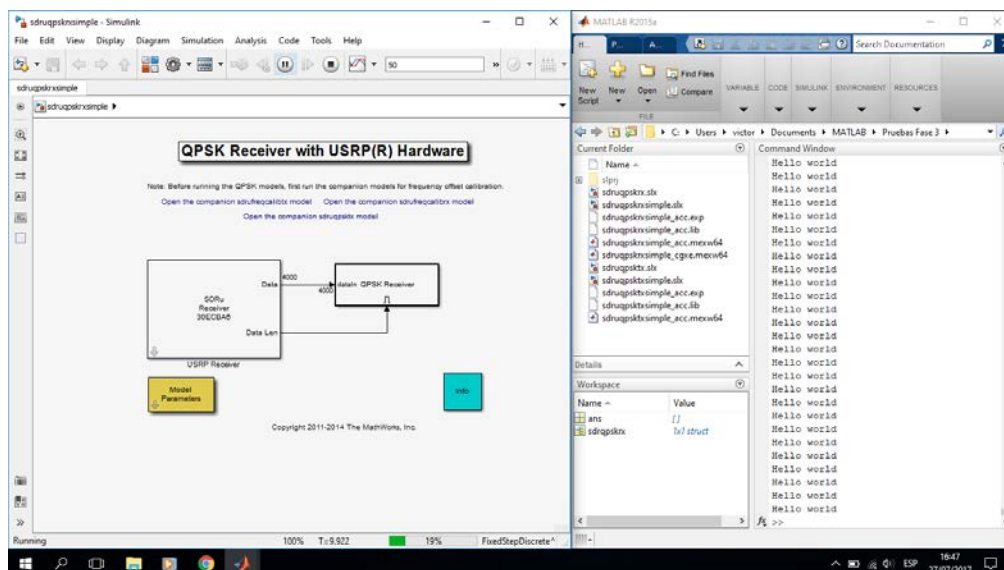


Figura 33. Mensaje recibido con éxito

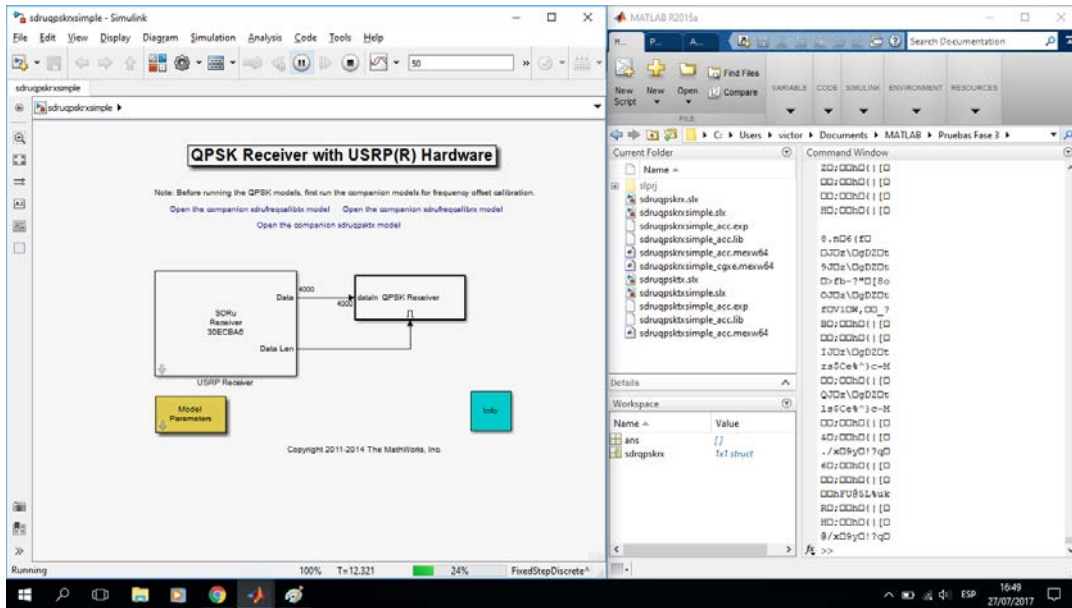


Figura 34. Errores en recepción

Posteriormente, como se muestra en la Figura 13, se conectan las antenas de transmisión y recepción; y se realiza la transmisión de datos a corta distancia para evitar efectos diferentes a los de un canal AWGN. En la Figura 14 se pudo notar el efecto del canal real en el proceso de transmisión, dispersando los símbolos transmitidos, generando errores en la transmisión de los datos, cabe resaltar que la distancia de separación entre transmisor y receptor es de 0 cm.



Figura 35. Sistema de transmisión empleando antenas omnidireccionales

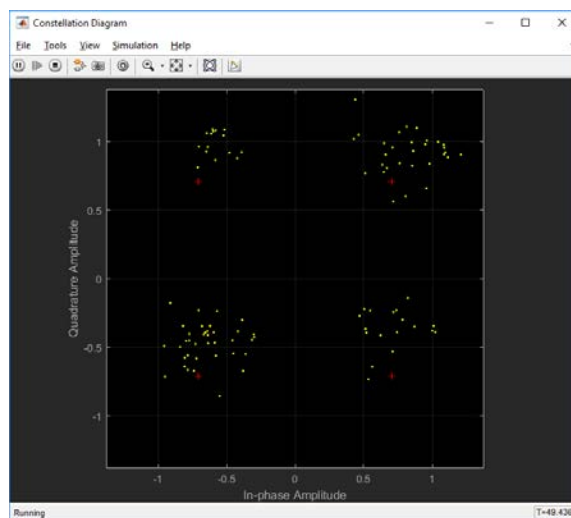


Figura 36. Constelación recibida

Adicional a las pruebas mencionadas, se realizaron modificaciones en el sistema como cambio de frecuencia de transmisión, antenas y variación de la distancia, corroborando los efectos adversos del canal. Al variar la distancia entre transmisor y receptor, se observó que, a 10 cm, la constelación recibida se dispersaba, pero el proceso de detección de la señal se llevaba a cabo con éxito en la mayoría de los casos. Cuando la distancia se incrementa a 20 cm se recibe señal con una mayor cantidad errores, esto se hace evidente en la Figura 15. Finalmente, al separar el transmisor y el receptor 40 cm, no es posible recibir la señal dado que, de acuerdo a la Figura 16, la constelación se encuentra completamente dispersa y el receptor no es capaz de detectar la señal transmitida.

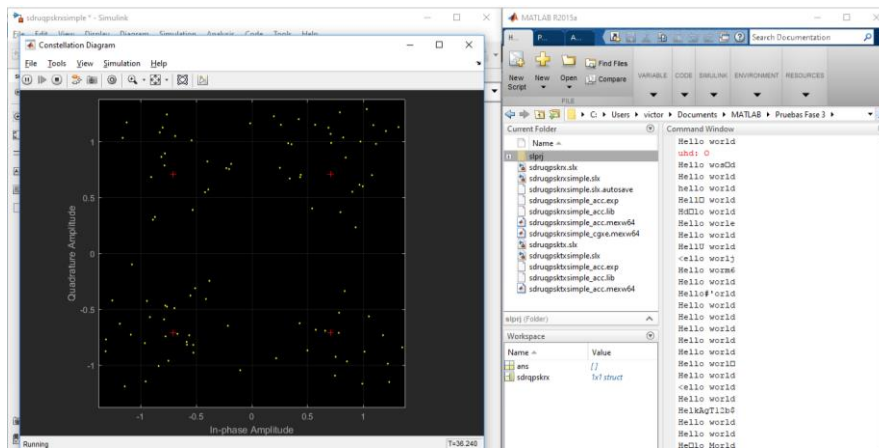


Figura 37. Recepción con separación de 20 cm

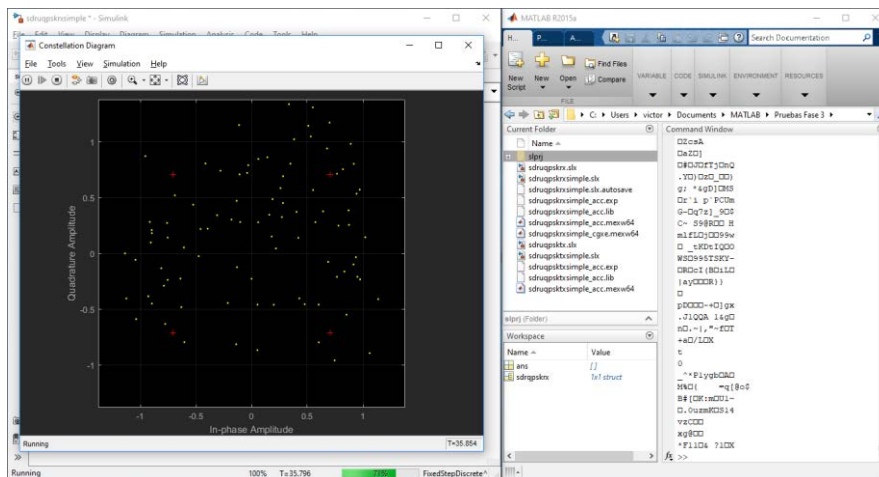


Figura 38. Recepción con separación de 40cm

Para las siguientes pruebas se incluye el módulo de codificación y decodificación, sin embargo, no siempre se consiguió recibir la señal enviada y se considera necesario dedicar una mayor cantidad de tiempo y esfuerzo al estudio del sincronismo en sistemas de comunicaciones implementados sobre USRP. De acuerdo a la bibliografía este es un aspecto crítico en el trabajo con estos dispositivos, como se puede notar en los resultados de las pruebas, Figuras 17 y 18, la constelación recibida tiene un comportamiento similar al obtenido sin la codificación, pese a esto el proceso de decodificación no se realiza de forma eficiente. De acuerdo a la Figura 19, en ocasiones se decodifica la frase "world hello", cuando lo transmitido fue "Hello world", esto se debe a que el receptor detectó la palabra en un punto intermedio causando error en recepción, posteriormente se pierde completamente el sincronismo, por lo cual se decodifican siempre los mismos caracteres de salida, que no corresponden al mensaje enviado, como se muestra en la Figura 20, evidenciando la problemática asociada al sistema implementado, dado que estos procesos requieren un alto sincronismo entre transmisor y receptor.

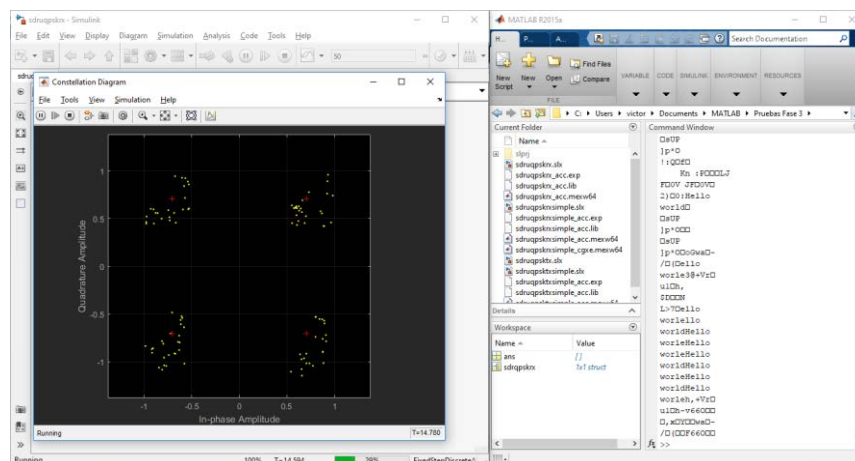


Figura 39. Recepción a 0 cm con codificación

Al incrementar la distancia a 20 cm la constelación empieza a degradarse causando errores eventuales en recepción, al llegar a una distancia de 40 cm, la constelación pierde su forma habitual y se presentan demasiados errores en

recepción, estos fenómenos se pueden observar en las Figuras 18 y 19. Sin embargo al comparar estos resultados con los obtenidos sin codificación a 40 cm, la constelación conserva aún su forma evidenciando los beneficios proporcionados por la codificación.

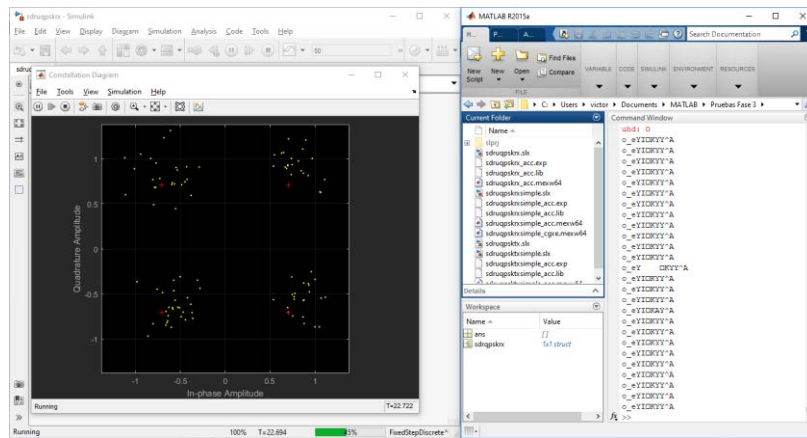


Figura 40. Recepción a 20 cm con codificación

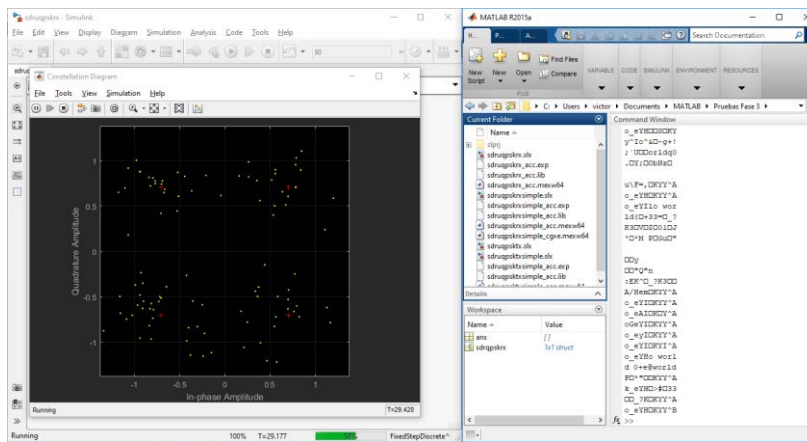


Figura 41. Recepción a 40 cm con codificación

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del desarrollo del proyecto aportan considerablemente a la incursión en el desarrollo de sistemas de comunicaciones sobre tarjetas USRP, permitiendo en primera instancia familiarizarse con el trabajo sobre dichas tarjetas y en segunda instancia identificar las potencialidades, limitaciones y necesidades para el trabajo con USRP. Por consiguiente, se resaltan las siguientes conclusiones.

- El sistema de comunicaciones que implementa codificación tiene una constelación más uniforme que el sistema que no utiliza codificación, esto se debe a que la señal está protegida y por tanto es más robusta frente a los efectos adversos del canal.
- Se debe profundizar en el proceso de sincronismo del sistema, tal que permita llevar a cabo un proceso de decodificación adecuado, los resultados evidencian la importancia de dicha sincronización.
- La utilización de tarjetas USRP facilita pruebas de técnicas de modulación y codificación en sistemas de comunicaciones, evidenciando la importancia y diferencia de transmitir en un entorno real. Además, permite apreciar los efectos adversos presentados en el canal, que en trabajos puramente teóricos o de simulación, no se pueden apreciar.
- Para trabajar con las URSP B 210 a distancias superiores a 40 cm, es necesario emplear antenas directivas y frecuencias de operación más bajas.
- Los resultados del proyecto y la experiencia obtenida, permiten explorar diferentes áreas de desarrollo, en investigación y proyectos futuros, es posible desarrollar trabajos en:
  - Comunicaciones móviles.
  - Sistemas de control remoto.
  - Aplicaciones para ciudades inteligentes.
  - Comunicaciones vehiculares

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca por su apoyo en la realización de este proyecto y a los grupos de investigación que respaldan este tipo de iniciativas.

## REFERENCIAS

- [1] Proakis, J. (2000). Digital Communications. McGraw-Hill.
- [2] Liu, E. (2004). Convolutional Coding & Viterbi Algorithm. Helsinki University of Technology.
- [3] Lee, C. (1997). Convolutional Coding: Fundamentals and Applications. Artech House.
- [4] Haykin, S. (2014). Digital Communication Systems. Wiley.
- [5] MIT (2010). Lecture 8. Convolutional Coding. MIT.
- [6] Ettus Research (2017). [USRP Hardware Driver and USRP Manual](#). Ettus research. Online [Nov 2017].
- [7] Ettus Research (2017). [USRP B200/B210 Specification sheet](#). Online [Nov 2017].
- [8] Chen, W. (1993). Linear Networks and Systems: Algorithms and Computer-Aided Implementations. Wadsworth.

# Diseño y Simulación de Arreglos de Antena en la Frecuencia de 72 GHz (Banda – E) para empleo en Redes Móviles 5G

Javier E. Arévalo P.<sup>1</sup>

Ricardo A. González B.<sup>2</sup>

Fundación Universidad Autónoma de Colombia  
Bogotá – Colombia

Las próximas redes móviles de quinta generación (5G) están concebidas para dar una conectividad inalámbrica que sea económica y con un gran ancho de banda. Esta situación demanda la necesidad de tener un espectro de banda ancha y el utilizado actualmente está demasiado limitado, por lo que hace algunos años atrás se propuso para la utilización en los sistemas 5G una parte del espectro radioeléctrico conocida como banda milimétrica (mmWaves), ubicada entre los 30 GHz y los 300 GHz, donde existen grandes anchos de banda que pueden usarse para ofrecer altos ordenes transmisión de datos a usuarios móviles. Así mismo, las pequeñas longitudes de onda a estas frecuencias permiten el diseño de componentes de tamaño reducido, entre ellos, las antenas para las estaciones base y los dispositivos móviles. El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y simulación de arreglos de antenas parche para operar en 72 GHz en el rango de frecuencias de la Banda (71 GHz a 76 GHz) empleando la herramienta de software CTS Microwave Studio. El resultado son diseños de arreglos optimizados para aplicación en próximas redes 5G que operen en estas frecuencias de ondas milimétricas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones móviles han tenido un gran avance desde sus inicios y el gran creciente uso de los dispositivos tecnológicos por parte de usuarios que están conectados a la red inalámbrica, ha podido dar cuenta que las redes actuales de comunicaciones móviles no son suficientes para la satisfacción de las necesidades que los usuarios están demandando. Por esto, en muchos países se comenzó a trabajar y experimentar con la evolución de las redes móviles hacia los nuevos sistemas de comunicaciones de quinta generación (5G), acompañado de investigación en comunicaciones en ondas milimétricas para ampliar el ancho de banda de espectro radioeléctrico para poder cumplir todos los requisitos de los clientes [1].

En esta porción del espectro hay bandas de frecuencias disponibles puesto que no está siendo utilizado ampliamente para servicios de telecomunicaciones. Según mediciones y estudios realizados recientemente las frecuencias de 28 GHz, 38 GHz, 71-76 GHz y 81-86 GHz son las más convenientes para emplearse en esta parte del espectro radioeléctrico [2]. Adicionalmente, debido a la característica de pequeñas longitudes de onda en estas bandas es posible la fabricación de arreglos de antenas que cuente con una gran ganancia y que puedan ser instalados tanto en las estaciones bases como en los dispositivos móviles [3].

Este trabajo tiene la siguiente estructura. En la sección 2 se presentan las características generales de las redes 5G y de las ondas milimétricas, en la sección 3 se detalla el diseño básico de la antena parche en 72 GHz, en la sección 4 se presenta el diseño y simulación de los arreglos de antena a partir del diseño de la antena parche y finalmente se dan a conocer las conclusiones.

## 2. REDES 5G Y ONDAS MILIMÉTRICAS

### 2.1 Evolución hacia las redes móviles 5G

Al igual que las generaciones anteriores de redes móviles, la red 5G será un conjunto de tecnologías de red perfeccionadas. Esto apunta a lograr acceso ilimitado a la información y a la capacidad de compartir datos en cualquier parte y cualquier momento para el beneficio de las personas, los negocios y la sociedad en general. Los niveles de desempeño y requerimientos que necesitaran los sistemas y equipos 5G aún no están completamente definidos. Ya han comenzado algunas actividades de estandarización y se piensa que se inicie la comercialización de esta tecnología para el año 2020 [4].

La red 5G incluirá versiones avanzadas de acceso de radio, procesamiento en la nube, entre otras; así como algunas nuevas tecnologías complementarias, para soportar más dispositivos, de mayor diversidad y con requerimientos de operación diferentes. También serán importantes factores como la seguridad, el mantenimiento a largo plazo y el costo. Además, la necesidad de proporcionar conectividad a los próximos mil millones de suscriptores, constituye también un rol indispensable en la dirección del desarrollo de la futura tecnología [4, 5].

Entre los principales parámetros de desempeño que serán perfeccionados en las próximas redes 5G se encuentran la alta razón de datos, pues el crecimiento del tráfico móvil es la principal característica en estas redes. Por esto, tiene que proporcionar alta razón de datos más altas que las implementaciones actuales. Además, teniendo en cuenta las

---

<sup>1</sup> javier.arevalo@fuac.edu.co

<sup>2</sup> gonzalez.ricardo@fuac.edu.co

tendencias rápidamente emergentes de contenido más rico y servicios en la nube, la red 5G debe orientarse a proporcionar servicios de alta velocidad con una calidad de usuario más uniforme en comparación con LTE (Long Term Evolution). Se pretende ofrecer velocidades de transmisión de datos de 1 Gbps como mínimo desde cualquier lugar pudiendo alcanzar valores máximos de hasta 50 Gbps [5]. Cada generación de tecnología móvil ha logrado aumentar el desempeño del sistema mediante el uso adicional de bandas de frecuencias y mayores anchos de banda de transmisión; ya que esto permite aumentar la capacidad de tráfico y las razones de datos. La 5G no es una excepción, pues también deberá utilizar el espectro adicional para alcanzar las aspiraciones que se propone [6].

Además de proporcionar una velocidad de datos más alta, otro parámetro de importancia lo constituye la latencia. Actualmente, los valores de la latencia de ida y vuelta de las redes 4G están en el orden de los 15 ms, pudiendo satisfacer los requisitos de la mayoría de las aplicaciones actuales. Sin embargo, dadas las nuevas aplicaciones que están en los diferentes dispositivos inalámbricos, la latencia para redes celulares de la 5G deberá ser aproximadamente 1 ms. Esto permitirá que los futuros servicios en la nube mejoren su desempeño como Internet táctil, realidad aumentada y control dinámico y en tiempo real para los sistemas M2M (Machine to Machine). Otro requerimiento importante es la mayor capacidad del sistema 5G tiene que debe ser capaz de gestionar volúmenes de tráfico de órdenes de magnitud más grandes que las redes actuales.

El objetivo es lograr una capacidad del sistema mil veces mayor por kilómetro cuadrado [7]. El soporte de conectividad masiva 5G tiene que permitir que un número masivo de dispositivos se conecten simultáneamente a la red con el fin de soportar todos los servicios en tiempo conectado en la nube y más dispositivos de tipo de máquina para IoT (Internet of Things). El objetivo es lograr un aumento de cien veces en el número de usuarios conectados simultáneamente en comparación con las redes 4G [8].

El consumo de energía y el costo son otros parámetros de desempeño a tener en cuenta pues se espera que el consumo de energía por enlace disminuya. Puesto que la tasa de datos por enlace que será ofrecida aumentará en aproximadamente cien veces, entonces el costo y consumo de energía por bit deberá disminuir. Algunas tecnologías prometedoras tales como las comunicaciones de onda milimétrica podrían proporcionar un costo razonable y un consumo adecuado de potencia. La posibilidad de usar esta banda en la tecnología 5G constituye un paso significativo para lograr grandes anchos de banda de transmisión que permitirán alcanzar altas velocidades de datos en la red [9].

## **2.2 Frecuencias de ondas milimétricas y Banda E**

El espectro radioeléctrico que se ha usado para la mayoría de las redes comerciales se encuentra actualmente casi completamente ocupado e independientemente de la eficiencia se requiere mucho más ancho de banda. Por fortuna, existe un gran espectro disponible en el rango de las ondas milimétricas desde los 30 GHz a los 300 GHz con longitudes de onda de orden milimétrico (de 1 a 10 mm). Para lograr que el uso de esta banda satisfaga los requisitos de las redes móviles 5G se deben superar los desafíos impuestos por la propagación, tales como las grandes pérdidas de propagación y las pérdidas por obstáculos [9].

La banda de frecuencias de ondas milimétricas de 71 - 76 GHz y 81 - 86 GHz es conocida como la Banda-E y están permitidas en todo el mundo para las comunicaciones de ultra alta velocidad punto a punto [10]. Los sistemas inalámbricos de la Banda-E ofrecen capacidad de transmisión de datos de 1 Gbps con disponibilidad de cobertura portadora a distancias de más de un kilómetro pueden ser especialmente valiosos en regiones altamente congestionadas donde las frecuencias de microondas tradicionales son cada vez más difíciles de coordinar [11].

La banda E es una gran opción para soportar los requisitos de capacidad y rendimiento de servicios de la próxima generación, demostrada por el creciente y respetable número de implementaciones en todo el mundo en 10 años. Cualquier operador de red o compañía buscando transmitir grandes cantidades de datos debería considerar utilizar la banda E como opción para las comunicaciones móviles [12].

## **3. DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE RESONANTE A 72 GHZ**

### **3.1 Antenas parche**

Las antenas tipo parche también conocidas como antenas microstrip se emplean en aplicaciones donde el tamaño reducido de la antena es importante. Se pueden diseñar a partir de líneas de transmisión o resonadores sobre sustrato dieléctrico. Tiene como ventaja frente al dipolo convencional que no le afecta la radiación trasera y es posible colocarlas en una superficie plana. También ofrecen mayor directividad y ganancia, pero poseen menos ancho de banda. Se pueden alimentar con líneas impresas, a través de las ranuras, con sondas coaxiales, por acoplamiento de cavidades o mediante una línea de transmisión en el mismo plano del parche. Suelen tener varios tipos de configuraciones, tales como cuadrada, rectangular, pentagonal, triangular, circular, anillo, entre otras [13].

Una antena parche se compone de tres partes: plano de masa inferior, sustrato por encima del plano de masa y un elemento radiante que se sitúa encima del sustrato. El espesor característico de los parches se encuentra entre los 10 y 50  $\mu\text{m}$ , típicamente de 18 y 35  $\mu\text{m}$ , para este caso, se escoge un espesor de 10  $\mu\text{m}$  y se elige como material para el parche el cobre, que es un metal muy utilizado para este tipo de antenas. Los sustratos usados en las antenas de parche poseen típicamente una constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) en el rango de  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ , aunque normalmente no se



toman valores de  $\epsilon_r \geq 5$ . En este caso se adopta como sustrato el material dieléctrico FR-4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ). El espesor típico está comprendido entre  $0.002\lambda$  y  $0.05\lambda$ , se elige un espesor de  $20 \mu\text{m}$ , ya que para las frecuencias súper altas como la de 72 GHz se recomienda la elección de sustratos finos y de constante dieléctrica no muy baja para minimizar las radiaciones no deseadas. El plano de masa se elige comúnmente con un espesor idéntico al del parche y de un material que sea muy buen conductor, normalmente del mismo material que del parche [13-14].

### 3.2 Dimensiones preliminares de antena parche empleando CST Microwave Studio

El programa CST Microwave Studio de la empresa CST (Computer Simulation Technology) es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones de componentes de alta frecuencia. Dispone de una interfaz gráfica que permite generar todo tipo de superficies y volúmenes e implementa métodos de onda completa para el análisis de las estructuras que se modelan con el Método de la Integración Finita en el Dominio del Tiempo (FITD). La herramienta realiza un análisis del comportamiento electromagnético de los diseños y brinda gran flexibilidad proporcionando un rango de aplicación muy amplio, gracias a la variedad de tecnologías disponible y posibilita un análisis rápido y preciso de antenas, estructuras resonantes, conectores, filtros y muchos otros dispositivos. Adicionalmente, permite extraer todas las magnitudes de interés de las antenas, como ganancia, eficiencia, diagrama de radiación, parámetro de dispersión etc., y permite la optimización de los resultados obtenidos a fin de mejorar el desempeño del diseño [15].

Para obtener las dimensiones preliminares de la antena parche, se usa el método de línea de transmisión implementado con el apoyo de una herramienta de cálculo matemático como MATLAB. Para alimentar el parche fue escogido el método de acople directo, un método sencillo de fácil modelación y fabricación, que se adapta perfectamente a la forma del parche rectangular seleccionada. Este tipo de alimentación consta de una línea de transmisión conectada directamente al parche con una anchura generalmente mucho menor que dicho elemento radiante. En un punto de alimentación se debe procurar que este acoplado a  $50\Omega$  a la antena, o al menos, un valor muy cercano a este para lograr acople de impedancia ya que si no se logra este acople ocurren fenómenos indeseados como reflexiones de ondas en el punto de alimentación que provocan que disminuya la potencia de radiación y por tanto se degrade la eficiencia de la antena. Para calcular la profundidad ( $X_o$ ), ancho de la línea ( $W_o$ ) y ancho de aperturas de acople ( $Y_o$ ), a la que ha de conectarse la línea de alimentación al parche para asegurar el acople con el punto de alimentación, se realizó también una programación en MATLAB.

Después de haber desarrollado los métodos para la obtención de las dimensiones de la antena, se tendrá una antena preliminar. Estas dimensiones son muy importantes ya que sirven inicialmente para iniciar la simulación en el software CST Microwave Studio y así poder obtener los primeros resultados. Posteriormente poder optimizar la antena simple para mejorar las características de la antena y lograr su resonancia a 72 GHz. Por último, diseñar el arreglo de antenas partiendo de la antena ya diseñada. En las Tablas 1 a 3 se presentan las características del diseño preliminar de la antena.

**Tabla 23.** Características de los materiales de la antena

Componentes	Material	Características
Parche	cobre	$\sigma = 5.96 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
Sustrato	FR-4	$\epsilon_r = 4.3, \tan \delta = 0.025$
Plano de masa	cobre	$\sigma = 5.96 \cdot 10^7 \text{ S/m}$

**Tabla 24.** Dimensiones preliminares de la antena

Componentes	Largo	Ancho	Espesor
Parche	3.144mm (lx)	4.006mm (wy)	$10 \mu\text{m}$ (hp)
Sustrato	3.264mm	4.126mm	$20 \mu\text{m}$ (hsub)
Plano de masa	3.264mm (lgx)	4.126mm (wgy)	$10 \mu\text{m}$ (hpm)

**Tabla 25.** Dimensiones preliminares del acople

Parámetros	Dimensión
$X_o$	0.56 ( $X_o$ )
$W_o$	0.801 ( $W_o$ )
$Y_o$	0.2 ( $Y_o$ )

Existen varios parámetros para analizar el comportamiento de una antena simulada. Uno de los más significativos es el parámetro de dispersión S11 o pérdidas de retorno. Esta muestra las frecuencias a las que la antena tiende a resonar. Otro parámetro para analizar el comportamiento de una antena es el diagrama de radiación, el cual muestra la dirección hacia donde se distribuye y va dirigida la energía electromagnética radiada por la antena. También, otros parámetros de interés son la directividad, la ganancia y las eficiencias de radiación y total de la antena. En la Tabla 4, se presentan los valores de la antena parche simulada. El valor de la directividad de la antena es adecuado ya que en este tipo de antenas debe oscilar por los 5 dBi. Por otra parte, el valor de la ganancia es negativa quiere decir que la antena diseñada no brinda ningún tipo de señal para alguna red móvil, al igual que los valores de eficiencia de radiación y eficiencia total son valores muy grandes evidenciado nuevamente que existe desacople de impedancias en la antena, que está provocando la degradación de su desempeño. Esto conlleva a que sea necesario optimizar la antena diseñada.

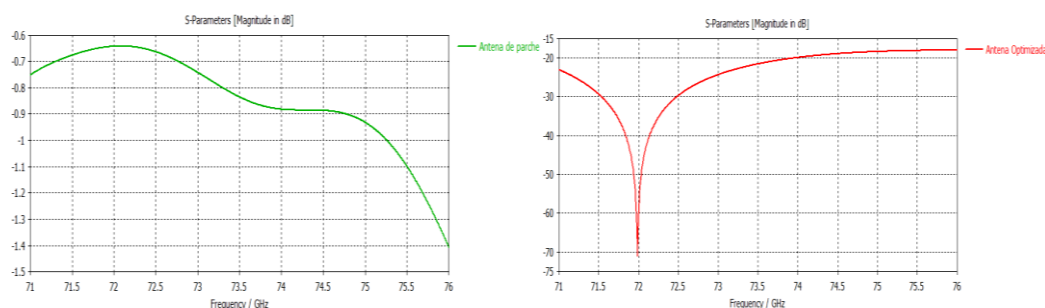
**Tabla 26.** Parámetros fundamentales de la antena de parche

Parámetros	Antena
Pérdidas de retorno (S11)	S11 = -1.406 en f=76 GHz
Directividad (Do)	Do = 7.002 dBi
Ganancia (Go)	Go = -9.987 dB
Eficiencia de Radiación ( $\eta_{rad}$ )	$\eta_{rad}$ = -16.99 dB
Eficiencia de Total ( $\eta_T$ )	$\eta_T$ = -17.93 dB

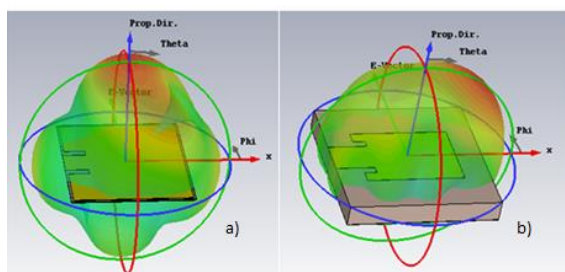
El software CST Microwave Studio es de gran apoyo puesto que permite optimizar los diseños realizados sin necesidad de estar cambiando las dimensiones de forma manual, simplificando el proceso de implementación. Lo que el programa efectúa es realizar múltiples simulaciones y comparaciones, es decir, partiendo de los resultados de una simulación realiza una modificación en las dimensiones que se especificaron y simula entonces para estas nuevas dimensiones, luego realiza una comparación entre ambas simulaciones quedándose con la de mejor resultado. Este proceso continúa hasta que se haya completado los resultados que se desean obtener. Una vez concluido el proceso de optimización el programa informa de los valores que arrojaron el mejor resultado para el parámetro que se deseaba optimizar.

### 3.3 Comparación antena parche preliminar y optimizada

En la Figura 1 se comparan gráficamente el parámetro S11 de la antena preliminar obtenida mediante el método de línea de transmisión y el de la antena optimizada con la ayuda del CST Microwave Studio. También se comparan los diagramas de radiación de ambas antenas en la Figura 2 y finalmente se resumen sus parámetros en la Tabla 5.



**Figura 1.** Comparación del parámetro S11 de la antena preliminar y la antena optimizada



**Figura 2.** Comparación del patrón de radiación de la antena preliminar y la antena optimizada.

**Tabla 5.** Comparación parámetros fundamentales de la antena preliminar y antena optimizada

Parámetros	Antena preliminar	Antena optimizada
Pérdidas de retorno (S11)	-1.406 en F=76 GHz	-68.69 en F=72 GHz
Directividad (Do)	7.002 dBi	7.806 dBi
Ganancia (Go)	-9.987 dB	5.019 dB
Eficiencia de Radiación ( $\eta_{rad}$ )	-16.99 dB	-2.787 dB
Eficiencia de Total ( $\eta_T$ )	-17.93 dB	-2.810 dB
Ancho de banda (BW)	No analizado	1.753 GHz para S11=-25 dB

Se puede observar que las anteriores gráficas y tablas si tienen un gran cambio y el desempeño de la antena ha sido mejorado, es por eso la importancia que tiene la optimización en este tipo de antenas. Las dimensiones finales de la antena se pueden observar en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Dimensiones finales de la antena parche optimizada

Componentes	Largo	Ancho	Espesor
Parche	3.231mm (Lx)	2.401mm (Wy)	10 $\mu$ m (hp)
Substrato	5mm	5mm	700 $\mu$ m (hsub)
Plano de masa	5mm (Lgx)	5mm (Wgy)	10 $\mu$ m (hpm)

La antena de parche diseñada anteriormente constituye un elemento radiante que se adecúa a las características que típicamente poseen este tipo de antenas. Además, esta cumple con el requerimiento de diseño que se exige, es decir, ser resonante a 72 GHz. Por tanto, esta antena parche es apropiada para la realización de arreglos de antenas para esta banda de frecuencias.

#### 4. DISEÑO ARREGLOS DE ANTENA

Un arreglo de antenas está compuesto por un número elementos idénticos o antenas simples, por lo que es importante diseñar este elemento simple de manera que se adecúe a las características y comportamientos deseados que se desean lograr en el arreglo final. Una vez diseñado dicho elemento radiante, para este caso una antena parche, pueden ser conformados los arreglos de antenas. Una vez diseñada, simulada y optimizada la antena, además de que cumpla con las características que poseen este tipo de antenas y lo más importante que sea una antena de parche simple resonante a 72 GHz, se puede iniciar con el diseño y simulación del arreglo de antenas que serán implementados en forma rectangular y cuadrada.

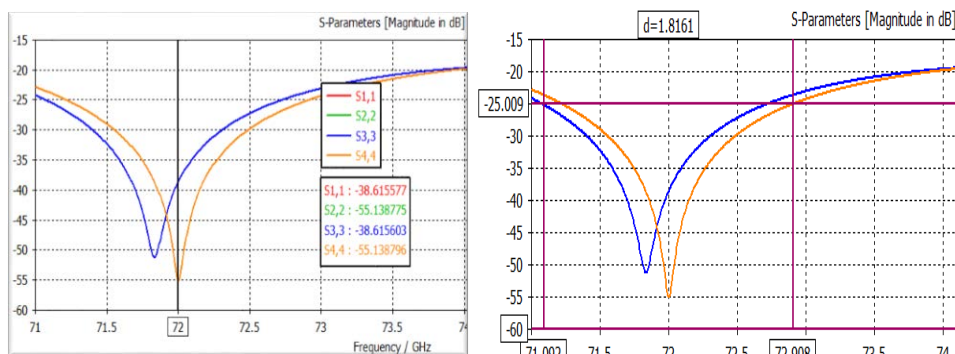
Se escogen estas configuraciones porque son de fácil modelamiento y fabricación, además que son de las más empleadas para la realización de arreglos de antenas de parche. Para la realización de un arreglo de antenas de parche en CST Microwave Studio se deben establecer a una distancia adecuada y conveniente la cual constituye el espaciamiento uniforme entre los elementos de antenas simples. El espaciamiento entre los elementos fue establecido cercano al valor de  $\lambda$ , este valor es de 6 mm ya que este es el que típicamente se adopta en los arreglos de antena. Han sido propuestas cinco configuraciones de arreglos 2x2, 2x3, 2x4, 3x3, y 4x4 con fin de analizar su comportamiento de cada arreglo y después comparar sus desempeños y resultados. En la Tabla 7 se resumen las dimensiones físicas y el número de elementos de los arreglos propuestos.

**Tabla 7.** Resumen de dimensiones físicas de los arreglos de antena

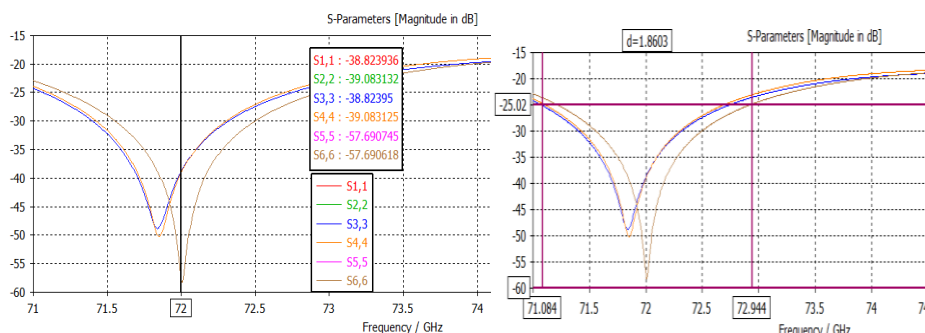
Arreglos de antena	Elementos	Dimensiones		
		Largo	Ancho	Grosor
Arreglo de 2x2	4	1.6 cm	1.6 cm	0.72mm
Arreglo de 2x3	6	2.7 cm	1.6 cm	0.72mm
Arreglo de 2x4	8	3.8 cm	1.6 cm	0.72mm
Arreglo de 3x3	9	2.7 cm	2.7 cm	0.72mm
Arreglo de 4x4	16	3.8 cm	3.8 cm	0.72mm

##### 4.1 Resultados simulación factor de dispersión y ancho de banda

Los parámetros S11 de los arreglos propuestos varían en comparación con el de la antena de parche simple, algunos de estos presentan un ligero desplazamiento en frecuencia. Este comportamiento se debe a que la impedancia de cada elemento del arreglo es diferente puesto que están desplazados a cierta distancia en los ejes X, Y, este parámetro de antena es afectado por que, cada objeto cercano a una antena provoca variación en su impedancia y por consiguiente los parámetros de desempeño de la antena se modifican. A pesar de estas variaciones, el comportamiento de este parámetro en los arreglos propuestos es aceptable, puesto que se mantiene en la banda de 71 GHz a 76 GHz, y además lo más importante que se encuentra resonando cercano a 72 GHz y con valores menores a -10 dB. El ancho de banda de reflexión de los arreglos presentados es de aproximadamente 2 GHz, tomando un valor de  $S_{11} \leq -10$  dB. En las Figuras 3 a 7 se muestran los resultados de simulaciones del factor de dispersión y ancho de banda para los arreglos estudiados.



**Figura 3.** Simulación factor de dispersión y ancho de banda arreglo 2x2



**Figura 4.** Simulación factor de dispersión y ancho de banda arreglo 2x3

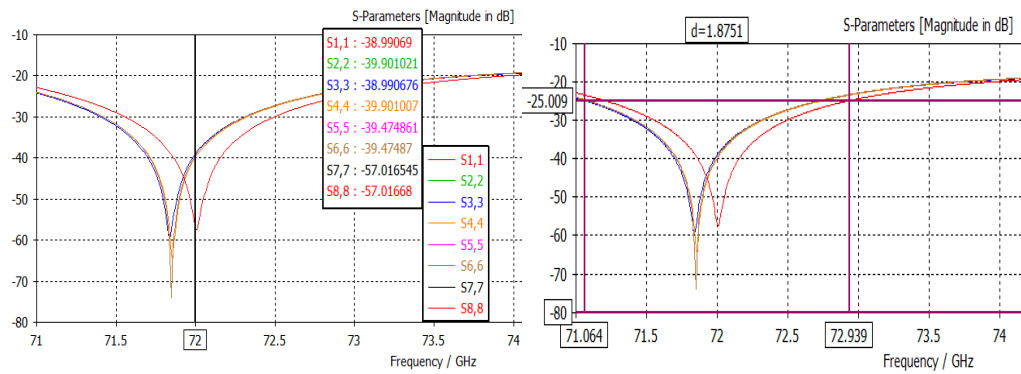


Figura 5. Simulación factor de dispersión y ancho de banda arreglo 2x4

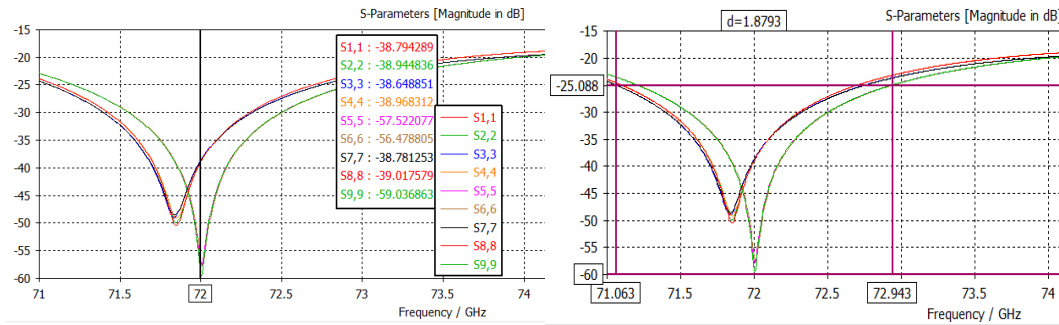


Figura 6. Simulación factor de dispersión y ancho de banda arreglo 3x3

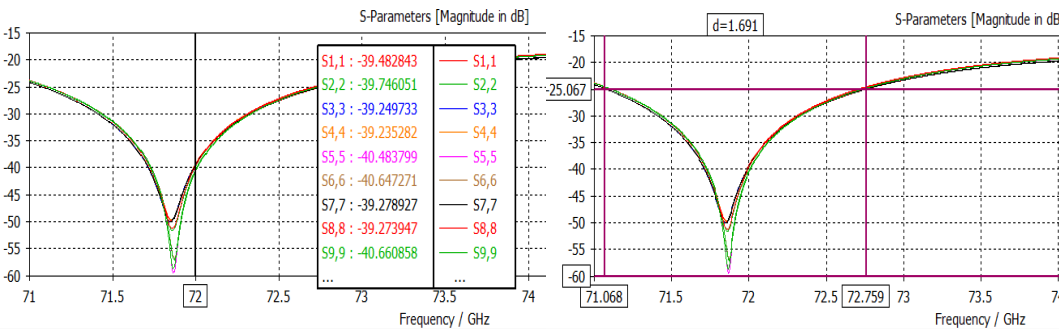


Figura 7. Simulación factor de dispersión y ancho de banda arreglo 4x4

#### 4.2 Diagramas de radiación

El diagrama de radiación de los arreglos de antenas en sus diferentes configuraciones muestra una variación poco significativa en comparación con el de la antena de parche simple. Mediante su análisis puede apreciarse que conforme se incrementa el número de elementos del arreglo este se hace más directivo y aumenta la ganancia.

Otro parámetro tomado en cuenta para medir el desempeño de los arreglos de antenas es el nivel del lóbulo secundario, cuyo módulo expresa una medida de cuántos decibeles supera el lóbulo principal al lóbulo secundario de mayor ganancia. Este parámetro varía en función de la configuración empleada, el número de elementos del arreglo y de la separación entre ellos. Este parámetro también indica la dirección del lóbulo principal y el ancho del haz, además del nivel de los lóbulos laterales y posteriores.

De la Figura 8 a la Figura 12 se presenta la simulación de los diagramas de radiación de los arreglos estudiados indicando los valores de los parámetros para cada uno.

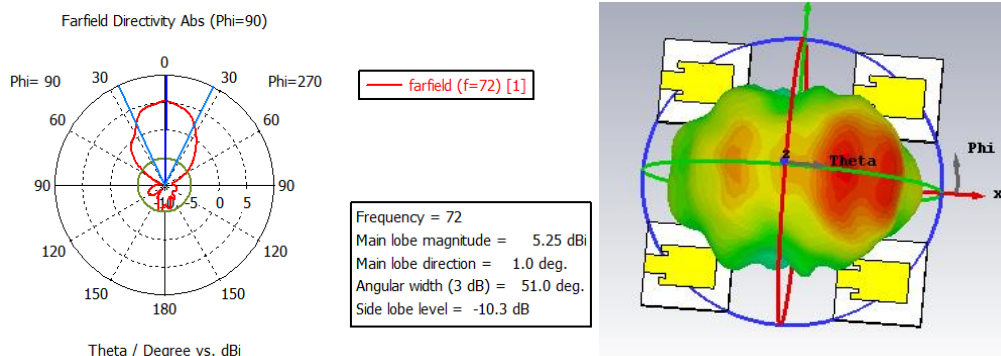


Figura 8. Diagrama de radiación arreglo 2x2

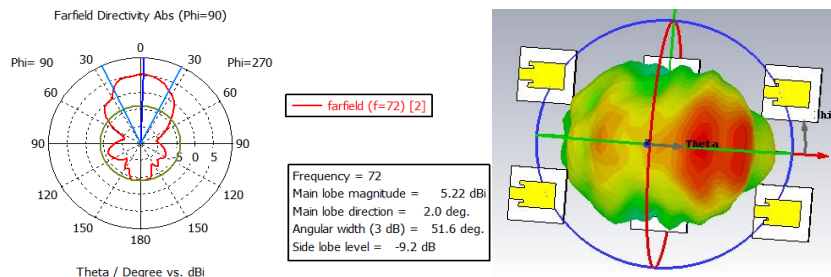


Figura 9. Diagrama de radiación arreglo 2x3

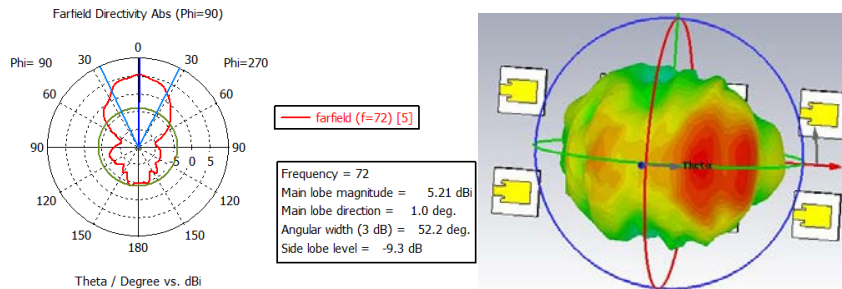


Figura 10. Diagrama de radiación arreglo 2x4

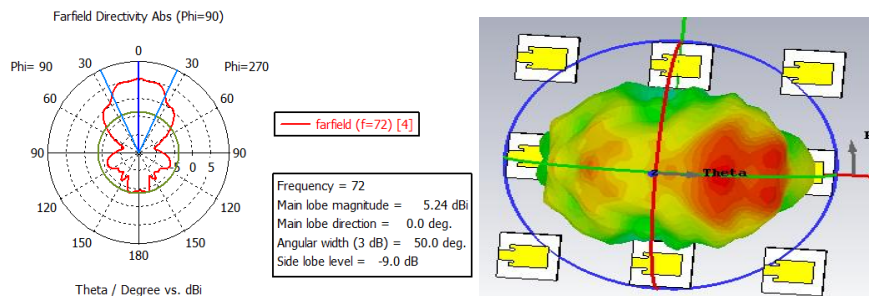


Figura 11. Diagrama de radiación arreglo 3x3

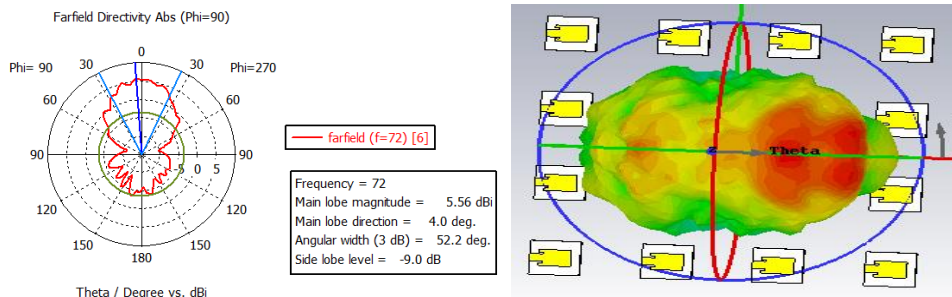


Figura 12. Diagrama de radiación arreglo 4x4

Del análisis anterior se puede decir que cuando se implementan arreglos de antenas partiendo de un elemento simple con las características adecuadas, se obtiene una antena que posee mejor desempeño en cuanto a diagrama de radiación, directividad, ganancia y ancho de banda; mientras que otros parámetros como las pérdidas de retorno y las eficiencias, se degradan en comparación con los del elemento simple que fue usado para conformar dicho arreglo. Los parámetros anteriormente analizados de los arreglos de antenas propuestos para la frecuencia de 72 GHz se resumen en las Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros arreglos de antena estudiados

Parámetros	2x2	2x3	2x4	3x3	4x4
Pérdidas de retorno (S11)	-46.87 en f=72 GHz	-45.19 en f=72 GHz	-44.46 en f=72 GHz	-45.12 en f=72 GHz	-44.05 en f=72 GHz
Directividad (Do)	8.243 dBi	8.237 dBi	8.310 dBi	8.359 dBi	8.495 dBi
Ganancia (Go)	5.389 dB	5.353 dB	5.414 dB	5.457 dB	5.588 dB
Eficiencia de Radiación ( $\eta_{rad}$ )	-2.854 dB	-2.884 dB	-2.89 dB	-2.901 dB	-2.908 dB
Eficiencia Total ( $\eta_T$ )	-2.876 dB	-2.910 dB	-2.92 dB	-2.929 dB	-2.934 dB
Ancho de banda (BW)	1.81 GHz para S11=-25 dB	1.86 GHz para S11=-25 dB	1.87 GHz para S11=-25 dB	1.879 GHz para S11=-25 dB	1.609 GHz para S11=-25 dB
Nivel de lóbulo lateral (SLL)	-10.3 dB	-9.2 dB	-9.3 dB	-9.0 dB	-9.0 dB
Ancho del haz (AW)	51°	51.6°	52.2°	50°	52.2°

Puede apreciarse de los resultados que con el aumento del número de elementos que conforman un arreglo de antenas de parche, incrementa la directividad, la ganancia, mientras que el nivel de los lóbulos laterales disminuye solo un poco, como se evidencia en los valores de este parámetro en las diferentes configuraciones. Otros parámetros como las pérdidas de retorno y las eficiencias no poseen variaciones muy marcadas cuando se incrementa la cantidad de elementos, mientras que el parámetro ancho de banda tiende a aumentar. Por tanto, se evidencia que los arreglos de antenas de parche mejoran su desempeño cuando el número de elementos que los integran es mayor, aunque se debe prestar especial atención al nivel de los lóbulos laterales ya que puede afectar el desempeño del sistema, traduciéndose en altos niveles de interferencia.

## **5. CONCLUSIONES**

En este capítulo se presentaron los pasos a seguir para el diseño y simulación de arreglos de antenas de parche para la banda de 72 GHz. Estos se resumieron en dos partes: diseño y simulación de una antena simple para la banda de 72 GHz y en una implementación de arreglos de antenas para esta banda a partir del elemento diseñado previamente.

Fueron empleadas las herramientas MATLAB para realizar los cálculos de las dimensiones de la antena y CST Microwave Studio para el modelamiento, simulación y optimización de la misma. Después, se propusieron cinco arreglos de antenas de parche diseñados para la banda de 72 GHz usando configuraciones cuadradas y rectangulares. Estos arreglos se modelaron y simularon también en CST Microwave Studio partiendo de la antena de parche diseñada previamente. A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se analizaron y compararon los arreglos implementados.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa el número de elementos, mejora el desempeño de los arreglos. Con el aumento del número de elementos que conforman un arreglo de antenas de parche, incrementa la directividad y la ganancia, mientras que el nivel de los lóbulos laterales disminuye levemente y el parámetro ancho de banda tiende a aumentar. Los arreglos de antenas de parche mejoran su desempeño cuando el número de elementos que los integran es mayor.

Como trabajo futuro se pretende realizar una implementación física del arreglo de antenas con sus respectivas mediciones para validar los resultados del software y su respectivo análisis. Así mismo, efectuar el diseño y simulación en otras bandas de frecuencias que puedan ser usadas en las futuras redes de comunicaciones móviles.

### **Agradecimientos**

Los autores desean agradecer al Sistema Unificado de Investigaciones – SUI de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia por el apoyo económico para desarrollar este trabajo. De igual manera, agradecen y reconocen a los Ingenieros Electrónicos Hugo Moreno y Michael Rodríguez por su apoyo técnico y documental para la obtención de los resultados de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Osseiran, A., Monserrat, J. & Marsch, P. (2016). 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press.
- [2] ANE (2013). Documento de Consulta Pública sobre las Consideraciones del Uso y la Asignación de la Banda E (71-76 GHz / 81-86 GHz) y la Banda V (57-64 GHz). Agencia Nacional del Espectro.
- [3] Rappaport, T. et al. (2015). Millimeter Wave Wireless Communications. Prentice Hall.
- [4] ERICSSON (2014). [5G: What is It?](#) Ericsson AB. Online [Nov 2017].
- [5] Qiao, J. (2015). Enabling Millimeter Wave Communication for 5G Cellular Networks: MAC-layer Perspective. Tesis de Doctorado. Universidad de Waterloo.
- [6] DOCOMO (2014). [5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies](#). NTT Docomo. Online [Nov 2017].
- [7] Andrews, J. et al. (2014). What Will 5G Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications 32(6), 1065–1082.
- [8] Sapakal, R. & Kadam, S. (2013). 5G Mobile Technology. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology 2(2), 568-571.
- [9] Niu, Y. et al. (2015). A Survey of Millimeter Wave Communications (mmWave) for 5G: Opportunities and Challenges. Wireless Networks: The Journal of Mobile Communication, Computation and Information 21(8), 2657-2676.
- [10] E-Band Communications (2016). [E-Band Technology](#). E-Band Communications Corporation. Online [Nov 2017].
- [11] Moreno, J. et al. (2013). E-Band (71-76 Ghz) Wireless Link using Compact Modules. Electronic Letters 49(7), 476-477.
- [12] Räsänen, A. et al. (2013). Studies on E-band Antennas and Propagation. In Loughborough Antennas & Propagation Conference.
- [13] Melo, B. (2011). Diseño y Caracterización de una Antena Plana Conformada para Recepción de TDT. Trabajo de grado. Universidad Politecnica de Valencia.
- [14] Torres, E. (2010). Optimización y Diseño de Antenas de Parche. Trabajo de grado. Universidad Carlos III de Madrid.
- [15] CST (2017). [Computer Simulation Technology](#). CST Computer Simulation Technology GmbH. Online [Nov 2017].

# Identificación de la señal de falta de control en un proceso de manufactura mediante redes neuronales haciendo uso de un gráfico de control MEWMA.

Gerardo Avendano<sup>1</sup>

Gustavo Campos A.<sup>2</sup>

Omar Alonso Patiño<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Universidad EAN

<sup>2</sup> Fundación Universitaria Konrad Lorenz

Bogotá – Colombia

Actualmente, los avances tecnológicos permiten el control estadístico en los procesos haciendo uso de métodos multivariantes. El gráfico MEWMA es más sensible a los cambios pequeños en el proceso en comparación con un gráfico T2 de Hotelling [6]. Ambos presentan una dificultad, no muestran la variable o variables causantes de una salida de control en el proceso. En este capítulo se presenta el uso de un gráfico de control multivariante MEWMA para el control de 3 variables en un proceso de manufactura real [1-7]. Se utiliza un método basado en redes neuronales para detectar la variable causante de la salida de control en el proceso

## 1. INTRODUCCIÓN

En esta investigación se diseña una red neuronal para ser utilizada con el gráfico de control multivariante MEWMA (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average). Este gráfico se utiliza cuando interesa detectar cambios pequeños en el comportamiento del proceso, ya que tiene en cuenta la información del pasado y no solamente la de la muestra actual.

Al igual que ocurre con todos los gráficos de control multivariante, el gráfico MEWMA presenta el inconveniente de indicar que se ha producido un cambio en el proceso, pero no muestra cuál o cuáles de las variables son las que originan este cambio. En este caso utilizando datos reales obtenidos de un proceso industrial se estudia el diseño y efectividad de una red neuronal que tenga por misión clasificar las variables en los grupos productores y no productores del cambio. El objetivo es que cuando el gráfico de control multivariante MEWMA [1] indica una salida de control del proceso se aplique la red neuronal para averiguar qué variables han cambiado. En la Figura 1 que se muestra a continuación se representa un proceso de producción que generaliza la función realizada por el gráfico y la red. Posteriormente en el desarrollo del trabajo, se muestran los pasos dados hasta llegar a obtener la red adecuada y, por último, en las conclusiones se describen los logros alcanzados con los datos del proceso industrial utilizado.

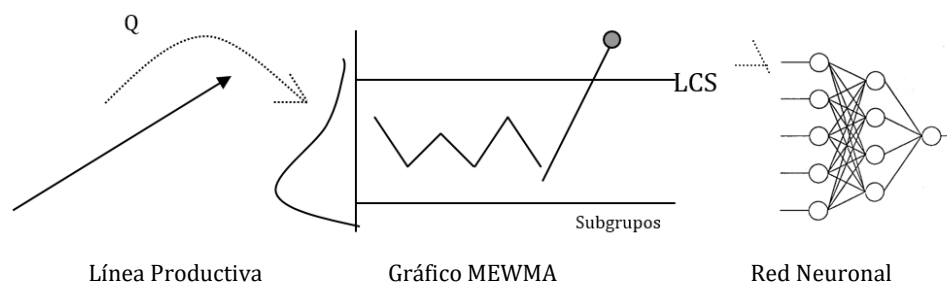


Figura 1. Utilización red neuronal con el gráfico MEWMA

De esta forma, el procedimiento queda como sigue. Los operarios van tomando muestras del proceso productivo a intervalos regulares y van procediendo al control del proceso mediante el gráfico MEWMA. En el momento que el gráfico indica una salida de control del proceso, la red neuronal detectaría las variables que han cambiado. Este procedimiento es mostrado en la Figura 1.

## 2. DESARROLLO

Los primeros trabajos del gráfico de control univariante de EWMA (precursor del gráfico MEWMA) fueron realizados por Roberts [16]. Este gráfico se utiliza como una alternativa al gráfico de Shewhart [17], Montgomery [15], cuando se quieren detectar cambios de pequeña magnitud. En la realización del gráfico EWMA se gráfica el estadístico  $Z_i$ , para lo cual se obtiene una media ponderada, variando un parámetro designado como  $r$ , entre el valor observado  $X_i$  y el predicho  $Z_{i-1}$ , según la ecuación (1).

$$Z_i = r\bar{X}_i + (1 - r)Z_{i-1} \quad (1)$$

<sup>1</sup> gavendanop@universidadean.edu.co

<sup>2</sup> gustavo.campos@konradlorenz.edu.co

<sup>3</sup> opatino@universidadean.edu.co



Cuanto menor sea el parámetro  $r$ , mayor será el peso de las observaciones pasadas, ya que estas se realizan de una manera exponencial. Cuando  $r = 1$  el valor del gráfico EWMA depende de la observación más reciente, siendo este el caso, del gráfico de Shewhart para la media. Cuando  $r$  es pequeño se da más peso al comportamiento histórico del proceso y en este caso se acerca al comportamiento del gráfico CUSUM. Un valor recomendado para  $r$  es 0.2 [11], y para  $Z_0$  generalmente se toma el valor nominal de la media  $\mu_0$  o el valor de la media muestral cuando el proceso se halla bajo control. Estudios del gráfico EWMA se encuentran en [11, 13, 15]. Los límites de control para el gráfico, suponiendo que la variable de calidad a controlar se distribuye según una normal  $N(\mu_0, \sigma_0)$ , y las observaciones o medias muestrales son independientes, se pueden calcular mediante la ecuación (2) aproximada [17].

$$UCL = \mu_0 + L \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{r}{2-r}}$$

$$LCL = \mu_0 - L \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{r}{2-r}}$$
(2)

Donde  $r$  y  $L$  son seleccionados para tener un ARL (número de muestras promedio que hay que tomar para que el gráfico detecte una señal de fuera de control) bajo control determinado, y  $n$  es el tamaño del subgrupo. El estudio del gráfico MEWMA ha sido planteado como una extensión multivariante del gráfico de control EWMA, [3, 8, 15, 16, 17, 18]. En el caso multivariante interesa el control simultáneo de  $p$  variables correlacionadas entre sí, con vectores de medias  $\vec{X}$  distribuidos según una normal  $p$ -variante de media  $\vec{\mu}$  y matriz de covarianzas  $\Sigma_0$ . En este caso el vector  $\vec{Z}_i$  se define con la ecuación (3).

$$\vec{Z}_i = r \vec{X}_i + (1-r) \vec{Z}_{i-1}$$
(3)

Donde  $\vec{X}$  es el vector de los datos muestrales y  $r$  un valor que se encuentra entre 0 y 1. Cuando  $r = 1$  se tiene el gráfico T2 de Hotelling. El estadístico a graficar resulta de la ecuación (4).

$$Q_i = \vec{Z}_i \Sigma_{z_i}^{-1} \vec{Z}_i$$
(4)

Donde la matriz de covarianzas se expresa mediante la ecuación (5).

$$\Sigma_{z_i} = \frac{r}{2-r} [1 - (1-r)^{2i}] \Sigma_0$$
(5)

Para el diseño del gráfico MEWMA se puede tomar la matriz de covarianzas dada por la ecuación (6).

$$\Sigma_z = \lim_{i \rightarrow \infty} \Sigma_{z_i} = \left( \frac{r}{2-r} \right) \Sigma$$
(6)

En el caso de tamaño de muestra distinto de 1 se obtiene la ecuación anterior corregida por  $n$ :

$$\Sigma_z = \left( \frac{r}{(2-r)n} \right) \Sigma$$
(7)

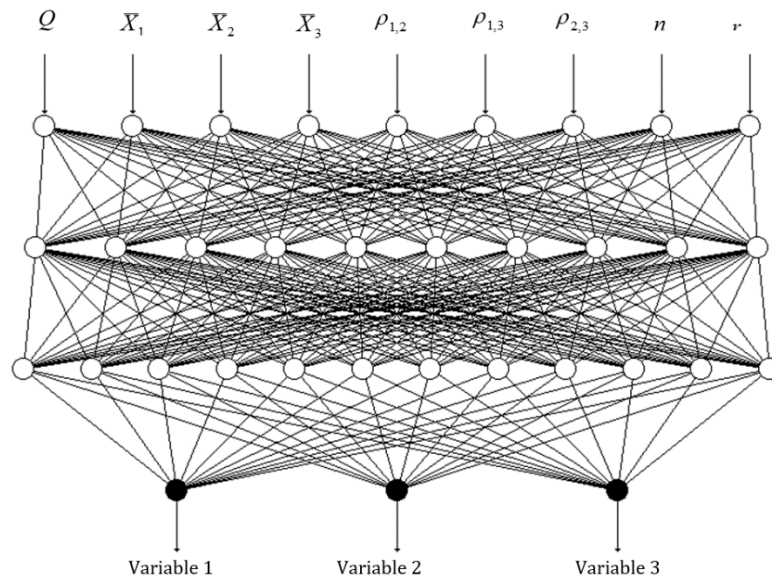
El gráfico muestra una señal de fuera de control, cuando  $Q_i > h$  siendo  $h$  el límite de control elegido para conseguir un valor determinado de ARL, estando el proceso bajo control. Un estudio detallado del gráfico MEWMA se encuentra en [18, 19], donde se muestran tablas y gráficas para la selección de los límites de control, mostrando desarrollos para diferentes valores de  $r$  y analizando diferentes características del gráfico.

### 3. METODOLOGÍA

Por medio del método exploratorio experimental se realizaron ensayos de diferentes estructuras de red, para obtener una red neuronal adecuada para tres variables. La red utilizada es del tipo backpropagation con funciones de activación sigmoides en cada una de sus capas. Como entradas a la red se tiene:

- Valor del estadístico  $Q$
- Valor de los estadísticos  $\bar{X}_1, \bar{X}_2$  y  $\bar{X}_3$
- Coeficientes de correlación entre las tres variables  $\rho_{1.2}, \rho_{1.3}$  y  $\rho_{2.3}$
- Tamaño de muestra  $n$
- Parámetro  $r$

Los parámetros [5] estudiados en el diseño de la red fueron el tamaño de muestra y el valor del punto de corte en las neuronas de salida. La estructura de red neuronal que obtuvo mayores porcentajes de aciertos, es una red de 4 capas en la cual la capa de entrada tiene 9 nodos, la primera capa interna es de 10 nodos, la segunda capa interna de 12 nodos y la capa de salida es 3 nodos. Un gráfico de esta estructura se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Estructura de la red utilizada con el gráfico MEWMA, caso  $p = 3$

### 3.1 Tamaño de muestra

En la Tabla 1 se encuentran los porcentajes de aciertos globales generados por la red neuronal, variando el tamaño de muestra. El porcentaje de aciertos aumenta con el tamaño de muestra. Por ejemplo, para  $n = 1$  el porcentaje es 50.7 % y para  $n = 3$  el porcentaje es de 56.0 %.

**Tabla 1.** Porcentaje de aciertos según el tamaño de muestra

Tamaño de muestra $n$	% de aciertos $p = 2$
1	50.7
3	56.0
5	61.5
7	63.3

### 3.2 Punto de corte

De manera coincidente como se los muestra en los estudios [1, 5, 6, 7] los resultados obtenidos por una red neuronal empleada para clasificar, como la utilizada en este caso, dependen del valor del punto de corte que se aplique a la salida de la red. Para optimizar el uso de la red neuronal, se varía el punto de corte en la salida entre 0 y 1. Los resultados encontrados para tres variables y un tamaño de muestra de  $n = 3$ , se muestran en la tabla 3.

**Tabla 2.** Porcentaje de aciertos según el valor del punto de corte

Punto de corte	% de aciertos $p = 3$
0.1	42.4
0.2	59.3
0.3	52.4
0.4	55.2
0.5	56.0
0.6	53.1
0.7	50.5
0.8	45.6
0.9	33.8

Los valores presentados en la Tabla 3, muestran que, al variar el punto de corte de la red neuronal, varía el porcentaje de aciertos. Es decir, para un valor de corte de 0.1 se tiene un porcentaje de aciertos de 42.4 % y para un valor de corte de 0.5 se obtiene un porcentaje de aciertos de 56

## 4. CASO DE APLICACIÓN

En la Tabla 3 se muestran datos reales obtenidos en la industria.

**Tabla 3.** Dimensiones para el ejemplo de aplicación usando el gráfico MEWMA,  $n = 3$

Bottles	Peso	Espesor	Diámetro
Simple 4	15.00	2.24	52,23

Con estos datos obtenemos el gráfico MEWMA (Figura 3) para las variables correlacionadas de peso, espesor y diámetro. Ponderación  $r=0,3$ . Salida muestra 21. Valor 14,36.

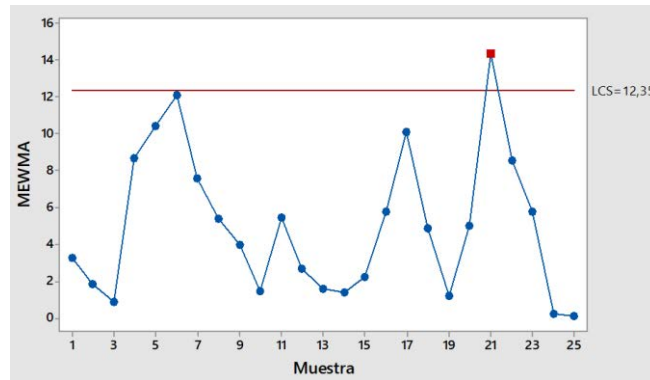


Figura 3. Gráfica de control MEWMA para los datos del caso de aplicación

## 5. SOFTWARE DESARROLLADO

Para la utilización práctica de este procedimiento se ha desarrollado un programa para Windows de sencillo manejo, en el que el usuario final no necesita tener conocimiento de redes neuronales, en la Figura 4 se muestra una pantalla de entrada para el caso de tres variables que muestra los resultados obtenidos del proceso industrial utilizado. Es decir, el usuario final debe introducir los datos de entrada de la red en la casilla correspondiente.

**INPUT REQUIRED VALUES AND CLICK PROCESS**

Q Value: 14.36

Sample Mean Var. 1 [X1]: 14.975    Sample Mean Var. 2 [X2]: 2.074    Sample Mean Var. 3 [X3]: 52.294

Correlation Coeff. [r1,2]: 0.372    Correlation Coeff. [r1,3]: 0.049    Correlation Coeff. [r2,3]: 0.09

Sample size [n]: 1    Smoothing Parameter [r]: 0.3

**NEURONAL NETWORK**

Variable 1: 0.995623

Variable 2: NO SHIFT, 0.004342

Variable 3: NO SHIFT, 0.004276

File Menu:  Use files for inputs and outputs.

Inputs file name:

Outputs file name:

PROCESS    Close

Figura 4. Software para la interpretación de la señal del gráfico MEWMA utilizando redes neuronales.

En este caso del proceso de fabricación de botellas obtenemos que el gráfico MEWMA muestra que el proceso está fuera de control y la red neuronal detecta que fue la variable peso de la botella es la responsable del cambio, todo ello utilizando el software desarrollado

## 6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos por una red neuronal empleada para clasificar, como la utilizada en este caso, dependen del valor del punto de corte que se aplique a la salida de la red. Para la red neuronal utilizada con el gráfico MEWMA, el mayor porcentaje de aciertos se tiene con un punto de corte de 0.5. Es decir, cuando el valor de la neurona de salida es mayor que 0.5, se supone que la media de esta variable ha cambiado en el proceso. El diseño de red que mayores porcentajes de aciertos tiene para el caso de tres variables, es una red de cuatro capas en total, con una capa de entrada de 9 nodos, una primera capa interna de 10 nodos, una segunda capa interna de 12 nodos y una capa de salida de 3 nodos. Para esta red de tres variables se encontró que el porcentaje de aciertos fue del 56.0%.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados encontrados se evidencia la innovación y utilidad del método aquí presentado ya que no se registran publicaciones a la fecha que utilizando redes neuronales se detecte la variable responsable del cambio que da el gráfico de control multivariado MEWMA. Con el desarrollo tecnológico de las industrias la funcionalidad de la innovación mostrada evidenciará la mejora de los procesos y por ende la ganancia económica de las empresas de puntas que lo utilicen.

## **8. CONCLUSIONES**

En esta Investigación se han utilizado redes neuronales para detectar la variable o variables que causan la señal de falta de control en un proceso, cuando el gráfico MEWMA detectada una salida de control. Se hallaron porcentajes de aciertos expresados en cada caso, según la red detectará qué variable o variables son las que han cambiado, es decir, las responsables de la señal de falta de control encontrada por el gráfico.

Se desarrolló un programa de sencillo manejo, que facilita la utilización práctica de este procedimiento, en el cual, el usuario final no necesita tener conocimiento de redes neuronales. Es decir, el usuario debe introducir los datos de entrada de la red en la casilla correspondiente, y el programa da como respuesta la variable que ha cambiado.

## REFERENCIAS

- [1] Aparisi, F., Avendaño, G. & Sanz, J. (2006). Techniques to interpret T2 control chart signals. *IIE Transactions* 38(8), 647-657,
- [2] Aparisi, F. et al. (2014). The variable sample size variable dimension T 2 control chart. *International Journal of Production Research* 52(2), 368-383.
- [3] Aparisi, F. & García, C. (2004). Optimization of univariate and multivariate exponentially weighted moving-average control charts using genetic algorithms. *Computers & Operations Research* 31(9), 1437-1454.
- [4] Atienza, O. et al. (1998). Quality Notes: Simultaneous monitoring of univariate and multivariate SPC information using boxplots. *International Journal of Quality Science* 3(2), 194-204.
- [5] Avendaño, G. et al. (2014). Guía de referencia para investigadores no expertos en el uso de estadística multivariada. *Diversitas* 10(1), 13-27.
- [6] Avendaño, G. et al. (2014). Optimización de procesos en Ingeniería. Ediciones EAN.
- [7] Avendaño, G. (2003). Interpretación de la señal de falta de control en gráficos multivariantes mediante redes neuronales. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [8] Bodden, K. & Rigdon, S. (1999). A program for approximating the in-control ARL for the MEWMA chart. *Journal of Quality Technology* 31, 120-123.
- [9] Campos, G. (2012). Caracterización y optimización de los gráficos X-RL2 para el control de la posición y S-RL2 para el control de la dispersión. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [10] Grasman, R., Huizenga, H. & Geurts, H. (2010). Departure from normality in multivariate normative comparison: The Cramér alternative for Hotelling's T 2. *Neuropsychologia* 48(5), 1510-1516.
- [11] Hotteling, H. (1947). *Multivariate Quality Control in Techniques of statistical Analysis*. Eisenhart, Hastay and Walls.
- [12] Hunter, J. (1986). The exponentially weighted moving average. *Journal of Quality Technology* 18(4), 203-210.
- [13] Crowder, S. (1989). Design of exponentially weighted moving average schemes. *Journal of Quality Technology* 21, 155-162.
- [14] Khoo, M., Quah, S. & Low, H. (2004). Powerful Rules for the Hotelling's  $\chi^2$  Control Chart. *Quality Engineering* 17(1), 139-149.
- [15] Lucas, J. & Saccuci, M. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancement's. *Technometrics* 32, 1-29.
- [16] Lowry, C. & Montgomery, D. (1995). A review of multivariate control charts. *IIE transactions* 27(6), 800-810.
- [17] Montgomery, D. (2008). *Statistical quality control*. New York.
- [18] Rigdon, S. (1995). An integral equation for the in-control average run length of a multivariate exponentially weighted moving average control chart. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 52, 351-365.
- [19] Roberts, S. (1959). Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics* 1, 239-250.
- [20] Runger, G., Alt, F. & Montgomery, D. (1996). Contributors to a multivariate statistical process control chart signal, *Communications in Statistics. Theory Methods* 25, 2203-2213.
- [21] Shewhart, W. (1931). *Economic control of quality of manufactured product*. D. Van nostrand co., Inc.

# Revisión de la literatura de prácticas para evaluar la calidad del servicio en instituciones de salud: Hacia un enfoque de Lean Healthcare

Ivanhoe Rozo R.<sup>1</sup>  
Lizeth F. Serrano C.<sup>2</sup>  
Flor N. Díaz P.<sup>3</sup>  
Universidad Católica de Colombia  
Bogotá – Colombia

El capítulo presenta los resultados de una revisión de literatura orientada a la identificación de tendencias en la evaluación de la calidad del servicio en instituciones de salud a nivel internacional mediante el uso de métricas de mejoramiento continuo. La metodología se estructuró en las siguientes etapas: construcción de la ecuación de búsqueda, verificación de calidad de los artículos, construcción de diagramas para identificación de tendencias, análisis de convergencias y divergencias. Se analizaron 85 artículos de la base de datos Scopus® a través del software de vigilancia tecnológica Vantage Point® donde resaltan el uso de las metodologías de calidad como six sigma, lean six sigma y otras tendencias. Se identificó que los principales departamentos donde se aplican procesos de mejoramiento son urgencias y cirugía debido al costo asumido en el sistema de seguridad social y por la criticidad con relación a la Política de Seguridad del Paciente. De igual manera, las tendencias muestran que algunas políticas públicas relacionadas con sistemas de salud a nivel internacional incluyen metodologías de calidad como *lean six sigma* y similares.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones de salud en Colombia hoy constituyen un importante eslabón de la economía [1] y, por tanto, las intenciones del Estado y el direccionamiento estratégico diseñado por los gerentes de las organizaciones de salud están orientadas al incremento de la productividad y de la rentabilidad. La visión del plan de negocios del Programa de Transformación Productiva para el sector de turismo de salud ha trazado una propuesta de servicios soportada en una base de costos competitivos, alta calidad e innovación en la prestación del servicio para recibir 2.8 millones de visitantes e ingresos por USD 6.300 millones. Estas ambiciosas intenciones de internacionalización de los servicios de salud de Colombia hacen pensar que las IPS adscritas al sistema de seguridad social están en condiciones óptimas para ampliar sus servicios en términos de cobertura y garantizar la calidad en los eslabones de la cadena de valor.

Sin embargo, publicaciones y datos del sector no identifican “buenas perspectivas” desde lo que Yepes et al [2] resumen como objetivos del modelo de atención en salud así: aumentar la cobertura y el acceso a los servicios de salud, mejorar la calidad y la eficiencia de los servicios de salud, mejorar la equidad en el acceso a los servicios de salud, y lograr mejores condiciones de salud en la población colombiana. Azuero [3] afirma que la regulación en Colombia no ha sido muy estricta en lo relacionado con los temas de calidad, e incluso, la adopción de estándares, criterios e indicadores ha sido un proceso que se ha delegado a las propias EPS o IPS. De igual manera, se plantea que, para garantizar un funcionamiento eficaz del sistema, se requiere la definición de estándares de atención de obligatorio cumplimiento, con capacidad para el usuario de verificarlos y que formen parte integral de la rendición de cuentas por tratarse de ser un derecho fundamental. En la actualidad, la medición de la calidad en los procesos de este tipo de organizaciones se realiza desde las auditorías internas para evaluar el cumplimiento de estándares internacionales expedidos por organismos normalizadores [4]. Velasco, Barrera y Amaya [5] exponen que es necesario un estudio descriptivo y económico del estado actual de las actividades logísticas que permitan la caracterización detallada de herramientas para la toma de decisiones, sistemas de información y los indicadores de desempeño que permitirán la orientación de políticas destinadas al aumento de la productividad.

Sustentado en las razones anteriormente expuestas, se identificó la necesidad de analizar el uso de metodologías asociadas al mejoramiento de la calidad y al incremento de la productividad en instituciones de servicios de salud que brinden una aproximación hacia un modelo conceptual para un modelo de evaluación de la calidad del servicio con base en herramientas e indicadores aplicado al contexto colombiano. La búsqueda de información se realizó en la base de datos Scopus® y el tratamiento de los datos se efectuó con apoyo del software de vigilancia tecnológica Vantage Point® para identificar las convergencias y divergencias entre los trabajos realizados por los autores e identificar tendencias del uso de Lean Six Sigma en la construcción de modelos y políticas públicas en servicios de salud.

## 2. LEAN SIX SIGMA Y LEAN HEALTHCARE

El mejoramiento continuo ha sido estudiado a lo largo del tiempo en organizaciones de producción y de servicios basado en técnicas y metodologías que han evolucionado a estándares internacionales de certificación. De hecho,

---

<sup>1</sup> irozo@ucatolica.edu.co

<sup>2</sup> lfserranoc@ucatolica.edu.co

<sup>3</sup> fndiaz@ucatolica.edu.co

Trkman [6] explica cómo a través del tiempo las organizaciones han buscado incrementar la competitividad desde el mejoramiento continuo, soportado en actividades y enfatiza a partir de una revisión de literatura que la base fundamental para lograrlo es la gestión por procesos donde converge la estrategia, la estructura, los procesos, la tecnología y el ambiente empresarial.

El principal marco de referencia para la certificación de la calidad de sus procesos es la ISO 9001 donde se orienta a través de principios de la calidad y el ciclo Deming o PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) [7]. Sin embargo, lo expuesto por [8-10] el uso de herramientas estadísticas en sistemas de gestión constituye un elemento que permite afianzar la toma de decisiones basada en datos y hechos, disminuir la variabilidad de los procesos y gestionar los procesos de las organizaciones. Estas necesidades imperantes han sido objeto de implementaciones de metodologías orientadas a la mejora de la eficiencia y la eficacia en los procesos productivos y transaccionales, derivando sus acciones en la disminución del desperdicio.

Por una parte, Six Sigma es reconocida como estrategia de resolución de problemas empleando técnicas estadísticas y el método científico para hacer reducciones en la variabilidad en los niveles de defectos y errores en los procesos [11-14]. Por otra parte, Lean Manufacturing permite la eliminación del desperdicio maximizando capacidades y minimizando los inventarios a través de la disminución de la variabilidad para producir un producto o desarrollar un servicio [15-20]. Estos enfoques ayudan a que las organizaciones puedan hacer sus procesos más ágiles y eliminar todo aquello que no agrega valor [21]. De esta manera surge Lean Six Sigma como una metodología que integra en el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) los pilares de la Manufactura Esbelta y las técnicas estadísticas de Six Sigma para la disminución de los defectos y errores en los procesos [22-25] y se han incorporado aportes de otras metodologías como se muestra en la Figura 1.

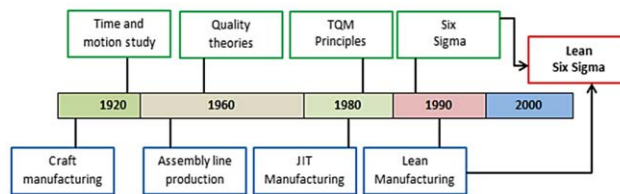


Figura 1. Evolución de la metodología Lean Six Sigma (Adaptado de [26])

La evolución de las tendencias en calidad y mejoramiento continuo han hecho que este tipo de enfoques se orientaran a los procesos asistenciales y transaccionales de las organizaciones médicas, integrando elementos a una nueva tendencia denominada Lean Healthcare. La Figura 2 ilustra la evolución de Lean Healthcare desde una perspectiva histórica derivada del análisis de la literatura, pero no se conoce con certeza cuál fue la primera aplicación de este tipo de metodologías en procesos médicos.

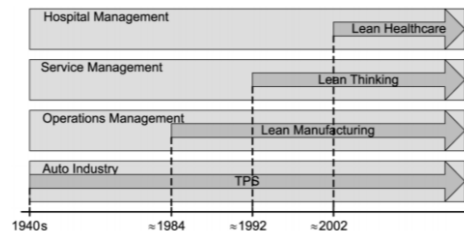


Figura 2. Trends and approaches in lean healthcare [27]

### 3. MÉTODO

La metodología (Figura 3) se diseñó con base en lo expuesto por [26] orientando un análisis de tipo cualitativo soportado en palabras clave en una base de datos reconocida. Se delimitó la búsqueda en la base de datos a partir del sector de aplicación, el tiempo y el idioma de redacción de los trabajos publicados. Se procedió a aplicar filtros de calidad, pertinencia e impacto (Tabla 1), verificando que guardara relación con la temática para su uso en el software de Vigilancia Tecnológica Vantage Point®. Por último, se identificaron las convergencias y divergencias del estudio usando la herramienta tecnológica para la obtención de gráficos de análisis de la temática.

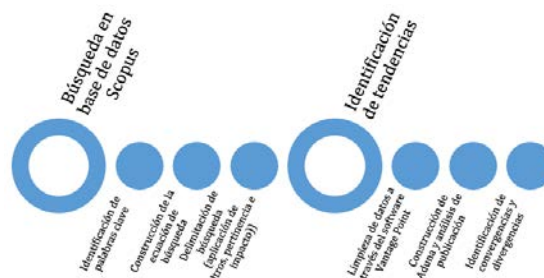


Figura 3. Diseño Metodológico

**Tabla 1.** Características del diseño metodológico [26]

<b>Tipo de investigación</b>	<b>Cualitativa</b>
Unidad de análisis	Artículos de investigación y de revisión relacionados con Lean Six Sigma o Lean Healthcare con relevancia para el objetivo y la clasificación del estudio, además de capítulos de libro y documentos de conferencia.
Limitaciones en la búsqueda	La búsqueda se orientó a artículos escritos en inglés orientados al sector salud (hospitales o clínicas).
Periodo de tiempo	2009 – 2018
Bases de datos utilizadas	Scopus®
Ecuación de búsqueda utilizada	TITLE-ABS-KEY (("lean six sigma" OR "six sigma" OR "lean healthcare") AND health) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2009)) AND ( LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))

## 4. RESULTADOS

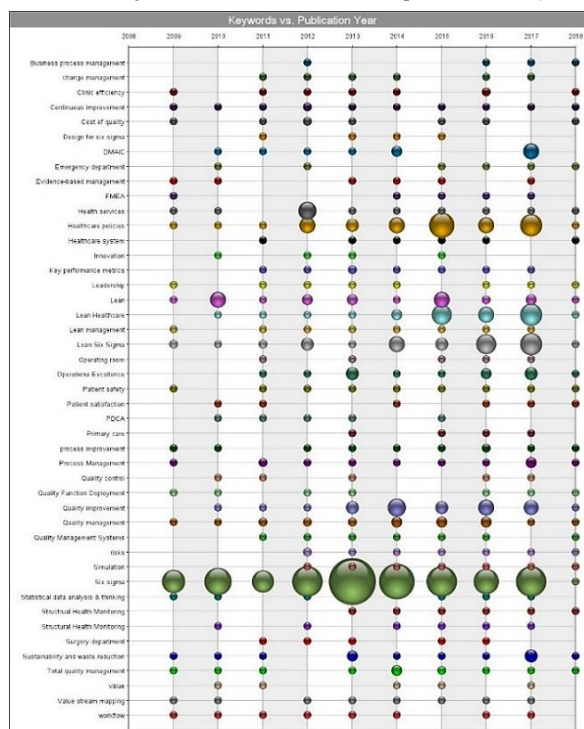
### 4.1 Búsqueda en bases de datos

La búsqueda en la base de datos Scopus® dio como resultado 1.382 artículos en las categorías investigación, revisión, documento de conferencia y capítulos de libro. Para el caso específico, se aplicaron filtros de calidad y pertinencia así: artículos escritos en idioma inglés, estudios aplicados de Lean Six Sigma, Six sigma o Lean Healthcare en el sector salud, demostración de mejoras en procesos asistenciales y transaccionales en instituciones del sector salud, así como estudios de formulación de políticas públicas utilizando estas metodologías de mejora, dando como resultado 85 artículos para analizar en el software Vantage Point®. La Figura 3 presenta el mapa de publicación por países para ilustrar las tendencias en publicaciones a nivel internacional (países que más publican), así como la tendencia de los tópicos de investigación.



**Figura 3.** Mapa de publicación por países

El país que publica mayor cantidad de artículos relacionados con el uso de Lean Six Sigma y Lean Healthcare en el sector salud es Estados Unidos con más de 125 registros sin depurar. Por otra parte, Canadá, India, Brasil, Inglaterra e Italia cuentan entre 50 y 124 registros no depurados de publicaciones. Se evidencia también, con un promedio entre 3 a 12 estudios, que algunos países como Colombia, China, Australia, España, Francia, Alemania y México utilizan esta metodología en procesos del sector salud para la mejora de la eficiencia de sus procesos. La Figura 4 presenta las tendencias investigativas por palabra clave y año a través de un mapa de burbujas:



**Figura 4.** Mapa de burbujas – Tendencias en Investigación



Se identificó que las palabras claves más representativas del estudio realizado son: “six sigma”, “lean six sigma”, “healthcare policies”, “lean healthcare” y “mejoramiento de la calidad” denotadas con un mayor tamaño de las burbujas, aludiendo tendencias en modelos de gestión de la calidad en instituciones de salud. El análisis continúa sobre las palabras clave en una Aduna o mapa de relaciones de palabras clave (Figura 5).

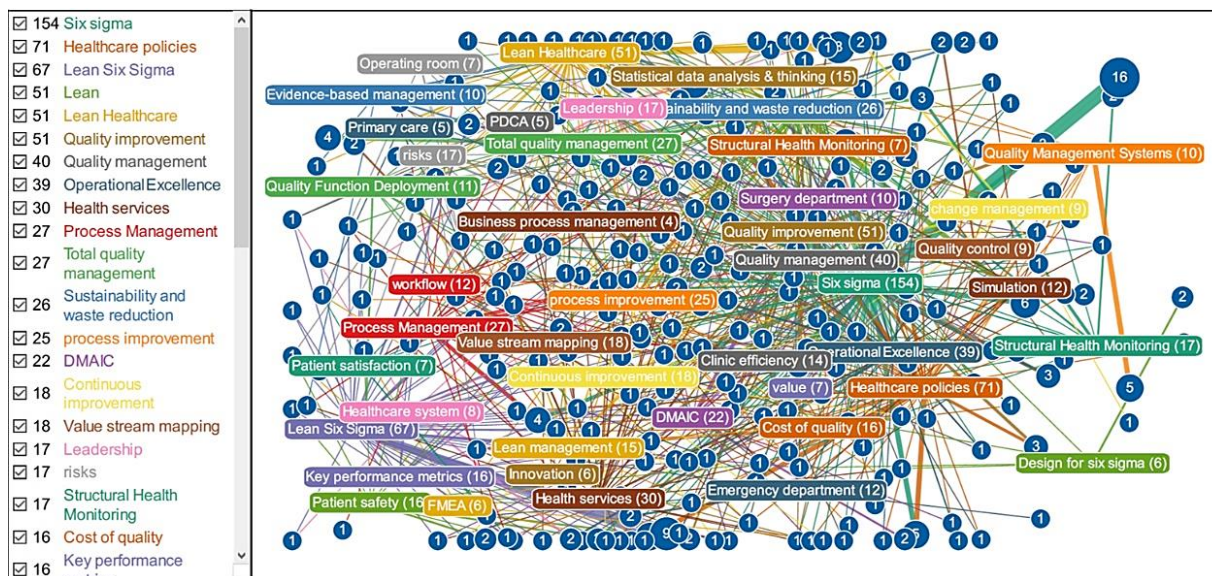


Figura 5. Aduna

De acuerdo con la Figura 5 se identifican relaciones entre las palabras clave resaltando el mejoramiento de calidad, excelencia operacional, políticas de salud, servicios de salud, mejoramiento de procesos, análisis y pensamiento estadístico, six sigma, lean six sigma y lean healthcare. De igual manera, el monitoreo de los sistemas de salud ha formado parte importante de las publicaciones orientadas a la productividad y la postulación de nuevas políticas de salud. El análisis se ampliará desde la identificación de convergencias y divergencias en la literatura.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Convergencias

Las aplicaciones de Lean Six Sigma se han utilizado para el mejoramiento de procesos en instituciones de salud en procesos como oncología [28], cirugía [29], ayudas diagnósticas [30] y laboratorio [31]. Estas aplicaciones se basan en la aplicación de herramientas comunes para reducir tiempos de espera, inventarios, medición de errores y niveles de calidad para incrementar la eficiencia de los procesos. El marco de trabajo para la aplicación de este tipo de procesos de mejoramiento ha sido el ciclo DMAIC [32-36] que han impactado procesos misionales y de apoyo con enfoque de excelencia operacional hacia la cadena de valor [37]. Entre los estudios analizados se resalta el uso de métricas de calidad del servicio [38-41] con el propósito de determinar los requerimientos de los clientes y diseñar estrategias encaminadas a su cumplimiento, incluso con sistemas de gestión de la calidad ISO 9000 [42-43]. El diseño de políticas públicas en salud está orientado al monitoreo y evaluación de los sistemas de salud usando métricas en para la gestión de los procesos [44-50] y se resalta como una tendencia investigativa internacional el uso de Lean Six Sigma (o su enfoque particular Lean Healthcare) para el diseño de marcos de referencia para el mejoramiento continuo [51-52]. Los casos de aplicación que evidencian una articulación con la política pública utilizan procesos investigativos y permiten que las instituciones de salud tengan parámetros definidos sobre los cuales puedan realizar acciones de mejoramiento y se encuentran adoptados por los gobiernos de los países [53-57].

### 5.2 Divergencias

Durante la revisión de literatura se identificaron elementos que han dificultado el diseño y puesta en marcha de una política pública “industrializada” del sistema de salud. La falta de planeación gubernamental es presentada en [58] como un aspecto relevante de la realidad contemporánea sobre los sistemas de salud y la prestación del servicio. En este sentido, [59] exponen que para implementar este tipo de metodologías de mejoramiento continuo a escala nacional es necesaria la financiación y capacitación del personal para obtener beneficios económicos constantes. Si bien la literatura presenta casos articulados con la alta dirección, en [60] se explica que también es necesario generar espacios de mejoramiento al interior de los programas de tal forma que se generen acciones empíricas y que se validen financieramente por los miembros del equipo del proyecto. Se explica también que los proyectos orientados a la generación de valor en los procesos asistenciales delinean características particulares en modelos tradicionales y locales [61]. El uso de la tecnología, si bien es un elemento trascendental en los procesos de mejoramiento, para el caso de Lean Six Sigma o Lean Healthcare podría apoyar los procesos de toma de decisiones a través de monitoreo en tiempo real de la atención de los pacientes [62], sin embargo, otros casos se reportan aplicados de manera experimental o por iniciativas institucionales que no han sido sistematizados.

## 6. CONCLUSIONES

Para el caso de Colombia, se analizaron cuatro casos [63-66] que evidencian la aplicación básica de unos proyectos de Lean y Six Sigma en procesos puntuales de las instituciones de salud donde se demuestra el potencial de estas metodologías para el mejoramiento de variables críticas para los pacientes. Ahora bien, en Sudamérica se reportan otros casos donde se vinculan herramientas de gestión de proyectos como el PMBOK [67] y acciones para el cuidado del medio ambiente [68] y monitoreados para construcción de políticas públicas o internas de las organizaciones para la medición del desempeño de los procesos [68-69].

El análisis de la literatura a nivel internacional evidencia que existe la necesidad de implementar sistemas de salud que incluyan mediciones más objetivas en la atención del paciente, de tal forma que las instituciones de salud puedan verse beneficiadas por un flujo mayor de trabajo y, por consiguiente, de ingresos operacionales. Lean Six Sigma en el sector salud (Lean Healthcare) se proyecta como una tendencia que podría apoyar la planeación de la demanda, la reducción de los errores y defectos en la prestación del servicio y mejorar el flujo de atención de pacientes [70-71].

Si bien los modelos de excelencia como los establecidos por ISQUA-ICONTEC y Joint Commission International establecen que las instituciones de salud deben tener estrategias o acciones de mejoramiento soportado en resultados y mediciones objetivas, no se establecen criterios básicos de habilitación en salud que permita dimensionar los atributos de la calidad en la atención en salud a partir de variables de desempeño, siendo necesario establecer modelos alternos con soporte estadístico que ayuden a mejorar la atención en salud [72-85].

## REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (2018). Programa de Transformación Productiva. Colombia.
- [2] Yepes, F. et al. (2010). Luces y sombras de las reformas de la salud en Colombia: Ley 100 de 1993. Universidad del Rosario.
- [3] Azuero, F. (2012). La organización institucional y la regulación en el Sistema General de Seguridad Social en Salud en Colombia. Ediciones Uniandes.
- [4] Jiang, L., André, P. & Richard, C. (2018). An international study of internal audit function quality. *Accounting and Business Research* 48(3), 264-298.
- [5] Velasco, N., Barrera, D. & Amaya, C. (2012). Logística Hospitalaria: Lecciones y retos para Colombia. Ediciones Uniandes.
- [6] Trkman, P. (2010). The critical success factors of business process management. *International Journal of Information Management* 30, 125-134.
- [7] Lo, C. & Yeung, A. (2018). Quality management standards, institutionalization and organizational implications: A longitudinal analysis. *International Journal of Production Economics* 200, 231-239.
- [8] Markarian, J. (2004) Six Sigma: Quality processing through statistical analysis. *Plastics, additives and compo.* 6(4), 28-31.
- [9] Bertolaccini, L., Viti, A. & Terzi, A. (2015). The statistical point of view of quality: the Lean Six Sigma methodology. *Journal of Thoracic Disease* 7(4), E66-E68.
- [10] Goh, T. & Xie, M. (2003). Statistical control of a Six Sigma Process. *Quality Engineering* 15(4), 587-592.
- [11] Mason, S., Nicolay, C. & Darzi, A. (2015). The use of Lean and Six Sigma methodologies in surgery: A systematic review. *Surgeon* 3, 91-100.
- [12] Lummus R., Vokurka, R. & Rodeghiero, B. (2006). Improving quality through value stream mapping: a case study of a physician's clinic. *Total Quality Management* 17(8), 1063-1075.
- [13] Wan, H. & Frank F. (2008) A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. *International Journal of Production Research* 46(23), 6567-6584.
- [14] Balamurugan, R. & Vijayakumar, R. (2018). Performance measures, analysis and improvements in healthcare sector by implementing TQM tools and techniques. *International Journal of Mechanical Production* 8(2), 971-980.
- [15] Alhuraish, I., Robledo, C. & Kobi, A. (2016). Assessment of Lean Manufacturing and Six Sigma operation with Decision Making Based on the Analytic Hierarchy Process. *IFAC-PapersOnLine* 49(12), 59-64.
- [16] Dickson, E. et al (2009). Application of Lean Manufacturing Techniques in the Emergency Department. *Journal of Emergency Medicine* 37(2), 177-182.
- [17] Resta, B. et al. (2015). Towards a framework for lean operations in product-oriented product service system. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, 12-22.
- [18] Vitáskova, E. (2015). Is Czech health care going to be lean? *Scientific papers of the University of Pardubice, Series D: Faculty of Economics and Administration* 22(34), 137-148.
- [19] Moraros, J. Lemstra, M. & Nwankwo, C. (2016). Lean interventions in healthcare: do they actually work? A systematic review. *International Journal for Quality in Health Care* 28(2), 150-165.
- [20] Tyagi, S. et al. (2015). Lean tools and methods to support efficient knowledge creation. *International Journal of Information Management* 35(2), 204-214.
- [21] Agarwal, S. et al. (2016). Impact of Lean Six Sigma process improvement on cardiac catheterization laboratory efficiency. *Cardiovascular Revascularization Medicine* 17(2), 95-101.
- [22] Yaduvanshi, D. & Sharma, A. (2017). Lean Six Sigma in Health Operations: Challenges and Opportunities—'Nirvana for Operational Efficiency in Hospitals in a Resource Limited Settings'. *Journal of Health Management* 19(2), 203-213.
- [23] Hoerl, R. & Gardner, M. (2010). Lean Six Sigma, creativity, and innovation. *Internat. Journal of Lean Six Sigma* 1(1), 30-38.
- [24] D'Andreanatteo, A. et al. (2015) Lean in healthcare: A comprehensive review. *Health Policy* 119(9), 1197-1209.
- [25] Aboelimged, M. (2015). Lean Six Sigma in healthcare: A review of theory and practice. *E-Health and Telemedicine. Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* 1, 94-117.
- [26] Ruben, R., Vinodh, S. & Asokan, P. (2018). Lean Six Sigma with environmental focus: Review and framework. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(9-12), 4023-4037.
- [27] De Souza, L. (2009). Trends and approaches in lean healthcare. *Leadership in Health Services* 22(2), 121-139.
- [28] Fratino, L. et al (2009). Evaluation of quality improvement initiative in pediatric oncology: Implementation of aggressive hydration protocol. *Journal of Nursing Care Quality* 24(2), 153-159.
- [29] Does, T. et al (2009). Reducing start time delays in operating rooms. *Journal of Quality Technology* 41(1), 95-109.
- [30] Zhang, A. et al (2011). Enhancing same-day access to magnetic resonance imaging. *Journal of the American College of Radiology* 8(9), 649-656.
- [31] Mann, E., Smith, G. & Hill, H. (2013) Increasing productivity in regulated bioanalytical laboratories. Maximizing the use of resources 5(13), 1605-1607.
- [32] Van Der Meulen, F., Vermaat, T. & Willems, P. (2011). Case study: An application of logistic regression in a six sigma project in health care. *Quality Engineering* 23(2), 113-124.
- [33] Pazeth, M. & Calache, L. (2017). Application of Lean Six Sigma concepts to medicine dispensation of public health centers. Springer.
- [34] Mayer, S. (2014). Redesigning services in a patient education resource center setting: A DMAIC Quality Improvement Project. *Journal of Hospital Librarianship* 14(2), 140-148.
- [35] Arun, S. (2014). Reducing and optimizing the cycle time of patients discharge process in a hospital using six sigma DMAIC approach. *International Journal for Quality Research* 8(2), 169-182.
- [36] Sutphin, P. et al. (2015). Improving inferior vena cava filter retrieval rates with the define, measure, analyze, improve, control methodology. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* 26(4), 491-498.
- [37] Furterer, S. (2014). Lean Six Sigma case studies in the healthcare enterprise. *Lean Six Sigma Case Studies in the Healthcare Enterprise*. Springer.
- [38] Sapir, T. et al. (2015). Tailoring CME with Chart Audits Linked to individual physician performance to improve rheumatoid arthritis quality measures. *Journal of Continuing Education in the Health Professions* 35(S1), S40-S41.

- [39] Fishman, D. (2010). Applying Lean Six Sigma methodologies to improve efficiency, timeliness of care, and quality of care in an internal medicine residency clinic. *Quality Management in Health Care* 19(3), 201-210.
- [40] Singh, B. et al. (2011). Application of sigma metrics for the assessment of quality assurance in clinical biochemistry laboratory in India: A pilot study. *Indian Journal of Clinical Biochemistry* 26(2), 131-135.
- [41] David, G., Chand, D. & Sankaranarayanan, B. (2014). Error rates in physician dictation: quality assurance and medical record production. *International Journal of Health Care Quality Assurance* 27(2), 99-110.
- [42] Chopra, V. et al. (2012). A case study: Application of statistical process control tool for determining process capability and sigma level. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology* 66(2), 98-115.
- [43] Aguezoul, A. & Nyongue, A. (2012). A preliminary analysis on Lean Six Sigma application in healthcare. In 9th International Conference on Service Systems and Service Management.
- [44] Westgard, J. & Westgard, S. (2016). Quality control review: implementing a scientifically based quality control system. *Annals of Clinical Biochemistry* 53(1), 32-50.
- [45] Topic E, et al. (2015). How to assess the quality of your analytical method? *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine* 53(11), 1707-1718.
- [46] Sciacovelli, L., Aita, A. & Plebani, M. (2017). Extra-analytical quality indicators and laboratory performances. *Clinical Biochemistry* 50(10-11), 605-611.
- [47] Hmad, O. et al. (2015). Verification and validation of structural health monitoring algorithms: A maturation procedure. *IFAC-PapersOnLine* 48(21), 952-957.
- [48] Hoang, N. et al. (2017). Administering Blood Products Before Selected Interventional Radiology Procedures: Developing, Applying, and Monitoring a Standardized Protocol. *Journal of the American College of Radiology* 14(11), 1438-1443.
- [49] Barach, P. & Kleinman, L. (2018). Measuring and improving comprehensive pediatric cardiac care: Learning from continuous quality improvement methods and tools. *Progress in Pediatric Cardiology* 48, 82-92.
- [50] Owens, D. (2011). Successful measures. Using Six Sigma to implement a work-request system. *Health facilities management* 24(2), 27-30.
- [51] Radnor, Z. et al. (2015). *Public service operations management: A research handbook*. Routledge.
- [52] DelliFraine, J. et al. (2014). The use of six sigma in health care management: Are we using it to its full potential? *Quality Management in Health Care* 23(4), 240-253.
- [53] McIntosh, B., Sheppy, B. & Cohen, I. (2014). Illusion or delusion – Lean Management in the health sector. *International Journal of Health Care Quality Assurance* 27(6), 482-492.
- [54] Nayar, P. et al. (2016). Applying Lean Six Sigma to improve medication management. *International Journal of Health Care Quality Assurance* 29(1), 16-23.
- [55] Harding, A. & Pritchard, C. (2016). UK and twenty comparable countries GDP-expenditure-on-health 1980-2013: The historic and continued low priority of UK health-related expenditure. *International Journal of Health Policy and Management* (5(9)), 519-523.
- [56] Qureshi, N., Qureshi, F. & Sajid, A. (2010). Current health of quality management practices in service sector SME A case study of Pakistan. *TQM Journal* 22(3), 317-329.
- [57] Robbins, J. et al. (2012). How high-performance work systems drive health care value: An examination of leading process improvement strategies. *Quality Management in Health Care* 21(3), 188-202.
- [58] Virtue, A., Chausalet, T. & Kelly, J. (2012). Healthcare planning - The simulation perspective. In ORSSW.
- [59] White, M., Wells, J. & Butterworth, T. (2014). The transition of a large-scale quality improvement initiative: A bibliometric analysis of the Productive ward: Releasing time to care programme. *Journal of Clinical Nursing* 23(17-18), 2414-2423.
- [60] Al-Balushi, S. et al. (2014). Readiness factors for lean implementation in healthcare settings - a literature review. *Journal of Health, Organisation and Management* 28(2), 135-153.
- [61] Colldén, C. et al. (2017). A value-based taxonomy of improvement approaches in healthcare. *Journal of Health, Organisation and Management* 31(4), 445-458.
- [62] Douglas, H. (2009). Bon Secours health system integrates Lean Six Sigma and knowledge transfer to drive clinical and operational excellence. *Global Business and Organizational Excellence* 28(6), 31-45.
- [63] Barrios, M. & Jiménez, H. (2015). Reduction of average lead time in outpatient service of obstetrics through six sigma methodology. *Lecture Notes in Computer Science* 9456, 293-302.
- [64] Ortiz, M. & Felizzola, H. (2016). Use of Six Sigma Methodology to Reduce Appointment Lead-Time in Obstetrics Outpatient Department. *Journal of Medical Systems* 40(10), 220-232.
- [65] Barrios, M., Jiménez, H. & Isaza, S. (2014). Comparative analysis between anp and anp-dematel for six sigma project selection process in a healthcare provider. *Lecture Notes in Computer Science* 8868, 413-416.
- [66] Ortíz, M., Felizzola, H. & Isaza, S. (2015). A contrast between DEMATEL-ANP and ANP methods for six sigma project selection: A case study in healthcare industry. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 15(3), S3.
- [67] Hors, C., et al. (2012). Application of the enterprise management tools Lean Six Sigma and PMBOK in developing a program of research management. *Einstein* 10(4), 480-490.
- [68] Furukawa, P., Cunha, I. & Pedreira, M. (2016). Evaluation of environmentally sustainable actions in the medication process. *Revista Brasileira de Enfermagem* 69(1), 16-22.
- [69] Costello, C. y Molloy, O. (2009). A process model to support automated measurement and detection of out-of-bounds events in a hospital laboratory process. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research* 4(2), 31-54.
- [70] Buestán, M. et al. (2017). Nursing-patient assignment optimization model using Lean Six Sigma. In 67th Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers 2017, 1252-1257.
- [71] DelliFraine, J., Langabeer, J. & Nembhard, I. (2010). Assessing the evidence of six sigma and lean in the health care industry. *Quality Management in Health Care* 19(3), 211-225.
- [72] Lucas, A. et al. (2016.) Rethinking behavioral health processes by using design for six sigma. *Psychiatric Services* 66(2), 112-114.
- [73] Schriefer, J. & Leonard, M. (2012). Patient safety and quality improvement: An overview of QI, *Pediatrics in Review* 33(8), 353-360.

- [74] Coleman, S. (2012). Six sigma in Healthcare. *Statistical Methods in Healthcare*. Wiley.
- [75] Trzeciak, S. et al. (2018). Lean Six Sigma to reduce intensive care unit length of stay and costs in prolonged mechanical ventilation. *Journal for Healthcare Quality* 40(1), 36-43.
- [76] Campatelli, G., Citti, P. & Meneghin, A. (2011). Development of a simplified approach based on the EFQM model and Six Sigma for the implementation of TQM principles in a university application. *Total Quality Management and Business Excellence* 22(7), 691-704.
- [77] Hassanain, M. (2017). An overview of the performance improvement initiatives by the ministry of Health in the Kingdom of Saudi Arabia. *Inquiry* 54.
- [78] Miller, N. et al. (2013). Jump starting a quality and performance improvement initiative to meet the updated ACGME guidelines. *Journal of Surgical Education* 70(6), 758-768.
- [79] Powell, A., Rushmer, R. & Davies, H. (2009). Effective quality improvement: conclusions. *British Journal of Health Care Management* 15(8), 374-379.
- [80] Niemeijer, G. et al. (2012). Impact of 5 years of Lean Six Sigma in a University Medical Center. *Quality Management in Health Care* 21(4), 262-268.
- [81] Fortineau, V. et al. (2016). Towards Lean Healthcare: Implementation of operations excellence in Public Hospitals. *Journal Europeen des Systemes Automatises* 49(2), 201-224.
- [82] Wickramasinghe, N. et al. (2014). *Lean Thinking for Healthcare*. Springer.
- [83] O'Neill, D. & Drescher, A. (2012). *Statistics Issues in Healthcare Facilities Management*. *Statistical Methods in Healthcare*. John Wiley.
- [84] Rozo, I., Ortiz, N. & Camacho, H. (2016). Diseño de un modelo integrado de calidad Lean ISO 9001:2015 en el departamento de urgencias a través de revisión de literatura. In *II Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería*.
- [85] Rozo, I. et al. (2017). Identificación de factores clave en la implementación de prácticas de gestión de calidad en centrales de Esterilización. In *15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*.

Esta investigación pretende construir una metodología a partir de las definiciones de las medidas que solucionan problemas relacionados con la distribución urbana de mercancías aportadas por investigadores. La metodología establece el estado actual de la Logística Urbana en diferentes ciudades alrededor del mundo. A partir de esto, las estrategias de solución y la selección de indicadores se obtienen de iniciativas internacionales exitosas en distribución de mercancías. Para validar la metodología propuesta se cuantifican los indicadores a partir del caso de estudio en distribución urbana de mercancía en Bogotá- Región. En conclusión, los indicadores con bajo desempeño muestran la oportunidad de implementar múltiples soluciones. Las soluciones deben contar con la participación de todos los actores involucrados y con una inversión de asociaciones público-privadas, para lograr una reducción del impacto negativo en el ambiente generado por el abastecimiento de mercancías en la ciudad.

## 1. INTRODUCCIÓN

La logística urbana de carga está relacionada con el transporte de carga y la utilización de la infraestructura de transporte urbano, en particular con la red de carreteras y con las zonas de parqueo. Tradicionalmente las administraciones municipales no la incluyen en los procesos de planificación, excepto a través de las normas dirigidas a controlar el acceso de determinados tipos de vehículos a ciertas zonas de la ciudad para regular la utilización de la infraestructura pública; por ejemplo, los espacios de estacionamiento para la descarga y carga de vehículos. Por lo anterior, y debido a las decisiones tomadas de manera individual por los actores del sistema, se genera de manera caótica un incremento en el número de movimientos de vehículos de carga [1]. Es así que, un modelo reducido de ciudad en la que se destacan varios de los elementos del sistema, como instalaciones, vehículos y rutas. Las decisiones individuales hacen que los sistemas de transporte urbano y de logística se superpongan, lo que provoca ineficiencias económicas, operacionales y ambientales, como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En lugar de tomar decisiones individuales, [1] proponen trabajar con decisiones coordinadas, en una infraestructura de ciudad interconectada y concéntrica, esto ofrece un marco de referencia para diseñar sistemas logísticos y de transporte urbanos eficientes y sostenibles. Algunas de las medidas sugeridas para solucionar los problemas de logística urbana [2] incluyen infraestructura muy costosa o de difícil realización y otras han sufrido de falta de conocimiento en el proceso de implementación y falta de alineación con el objetivo logístico para el cual han sido formuladas [3]. La Tabla 1 presenta un resumen de algunas medidas, con ejemplos, organizadas de acuerdo con el nivel de facilidad en su ejecución.

**Tabla 27.** Medidas tomadas para solucionar problemas de logística urbana [3]

Tipo	Ejemplos
Medidas organizacionales y legislativas	Sistemas logísticos cooperativos, fomento de entregas nocturnas, asociaciones público-privadas, Zonas de depósitos colaborativos
Restricciones de acceso	Restricciones de acuerdo a la característica de los vehículos (peso, volumen, número de ejes), restricciones a zonas peatonales, peajes, restricciones de movilidad periódicas
Medidas de manejo territorial	Creación de zonas de carga y descarga, de transferencia, plataformas logísticas de pequeña envergadura.
Medidas tecnológicas	GPS, sistemas de seguimiento, software de planificación de rutas, sistemas inteligentes de transporte, adopción de vehículos no contaminantes, vehículos adaptados a las características urbanas (tamaño y propulsión)
Medidas de infraestructura	Construcción de centros urbanos de distribución, de instalaciones para almacenamiento periférico, uso de infraestructura vial pública para carga carrileras, troncales públicas (BRT), uso de zonas subterráneas de carga.

1. *Medidas de restricciones de acceso.* Las medidas de restricciones de acceso son esencialmente reglas y prohibiciones que apoyan el control y el establecimiento del sistema. Están diseñadas para el control de las actividades privadas y el objetivo es beneficiar a la sociedad. La característica principal es que pueden ser implementadas fácilmente por la autoridad urbana, se puede generar estas acciones sobre ventanas de tiempo donde se libera la distribución de mercancías identificada por zonas, en áreas metropolitanas, esto busca minimizar las coincidencias de entregas y el alto nivel de tráfico. Por otro lado, las restricciones por peso y tamaño del vehículo, son esenciales para asegurar la circulación de vehículos de carga para evitar el daño a la infraestructura. Además, estas medidas, estimulan la construcción de vehículos más eficientes que puedan circular

<sup>1</sup> leylan.ramirezc@unilibre.edu.co

<sup>2</sup> alexandere.parodym@unilibre.edu.co

fácilmente por las calles y áreas de la ciudad. Las medidas de restricción pueden contribuir a la reducción de la congestión y de emisiones. Incluso proponer zonas de bajas emisiones con acceso limitado de vehículos de carga y de pasajeros para mantener los estándares mínimos de emisiones. En resumen, estas medidas contribuyen a la sostenibilidad de la movilización de la carga a nivel urbano y metropolitano, el impacto prioritario es la mejora de la calidad del aire y la salud humana, pero se puede armonizar con los costos de la operación haciendo más eficiente el tiempo de entrega.

2. *Medidas de manejo territorial.* Las autoridades urbanas pueden adoptar enfoques holísticos para planificar el uso del suelo teniendo en cuenta la demanda del transporte de carga y las necesidades de la industria, estas políticas pueden tener una contribución a la gestión de los espacios de parqueo en las áreas urbanas, zonas logísticas, terminales intermodales, zonas de cargue y descargue, requerimientos de conexión a gran escala de distribución intermodal. En resumen, se sugiere que las medidas territoriales sean abordadas en el mediano y largo plazo para lograr la distribución urbana sostenible. El desarrollo de políticas nacionales en el largo plazo, debe estar alineadas con el contexto local. Además, las características del territorio tanto espaciales como agronómicas influyen en la producción de alimentos, la disponibilidad de zonas para producción y la conectividad con las infraestructuras de los puntos de consumo.
3. *Medidas tecnológicas.* La tecnología puede reducir las emisiones de CO2 y mejorar la calidad del aire en las áreas urbanas para la distribución de última milla, a través de vehículos eléctricos o tecnología híbrida. La tecnología de las comunicaciones e información y los sistemas de transporte inteligente pueden incrementar la eficiencia de la movilización de carga para los privados y los operadores, la aplicación de estos sistemas provee información en tiempo real que pueden mejorar rápidamente los problemas de operación.
4. *Medidas de infraestructura.* El sistema vial cumple un rol importante para la movilización de carga, por esta razón las necesidades se incrementan cuando se habla de bajos costos de efectividad y cero emisiones, a esta condición se suma la conectividad con los diferentes sistemas carretero, ferrocarril y marítimo con los parques y plataformas logísticas de la región y las grandes zonas urbanas. Una red interconectada de nodos logísticos con una infraestructura adecuada puede aumentar la sostenibilidad de la movilización de la carga. El inventario y mantenimiento de la infraestructura logra beneficios de alto valor agregado para las actividades de distribución internacional, nacional y local.

Adicionalmente, los sistemas de abastecimiento tienen requerimientos esenciales para llevar a cabo su función operacional, para ello es necesario de igual manera analizar la disponibilidad de la infraestructura, equipamientos y servicios que son utilizados por los beneficiarios del sistema, ya que los agentes que interactúan en estos sistemas deben disponer de centros de acopio, servicios de almacenamiento y transporte entre otros servicios para garantizar la eficiencia de la distribución de alimentos, además la organización interna puede lograr la reducción de los impactos negativos derivados de la urbanización, la seguridad alimentaria y el acceso a los alimentos. Las tendencias en logística urbana apuntan a la generación de estrategias bajo las cuatro categorías expuestas anteriormente, a partir de allí se considera la metodología propuesta para el análisis comparativo que se detalla en la siguiente sección.

## 2. MÉTODO

Para el análisis comparativo se utiliza una serie de pasos, a partir de la selección de casos de estudio de experiencias internacionales en transporte urbano de carga y sistemas de abastecimiento y distribución utilizando un enfoque comparativo – inductivo, se trata de explicar su funcionamiento y mejores prácticas que pueden ser una guía para instituciones de gobierno que deseen emprender proyectos que solucionen problemas causados por el impacto negativo de la movilización de cargas de mercancía en las ciudades. Después la sistematización de la información y la selección de indicadores propenden por integrar una metodología que da iniciativas para la gestión de la logística urbana (Figura 1).



**Figura 42.** Estructura de la metodología para el análisis comparativo

1. *Selección de casos.* La información trabajada para este análisis proviene de las experiencias documentadas de Francia, Barcelona, España, los casos de transporte urbano de carga en ciudades reportado por BESTUFS (Best Urban Freight Solutions), START (Short-Term Actions to reorganise Transport of Goods Project), SUGAR (Sustainable Urban Goods Logistics Achieved by Regional and Local Policies), TURBOLOG (Transferability of urban logistics concepts and practices from a worldwide perspective), CIVITAS (Cleaner and Better Transport in Cities) y CLIEGE (Clean Last Mile Transport and Logistics Management)[1, 2, 4-10]. Donde se reportan algunos casos de estudio de ciudades latinoamericanas que tienen características similares en densidad demográfica comparado con Bogotá – Región. Para el análisis de Sistemas de Abastecimiento y Distribución de alimentos se propone el caso

de estudio de la ciudad de Parma ubicada en Italia, reconocida por el desarrollo e innovación en su sistema de distribución urbana de alimentos y la alta calidad de sus productos. Esta ciudad con una población total aproximada para el 2016 de 413.182 habitantes, se considera un sistema sostenible apoyado por política pública [11].

2. *Identificación y clasificación de los casos dentro de las categorías seleccionadas.* En este sentido la guía de este análisis se hace a partir de las categorías de las medidas necesarias para resolver los problemas asociados al transporte de carga. Explicadas en la sección anterior. El análisis comparativo consiste en seleccionar casos del fenómeno que se desea explicar, se explora desde las variables de elección que respondan a una pregunta guía de interés. Una vez, realizada la selección de casos y variables de análisis se utiliza una matriz de datos donde las filas son los casos y las columnas las variables, este esquema de similitud binario permite asignar un valor de 1 si el caso de estudio responde a la variable de análisis y valor de 0 cuando esta relación está ausente [12], para el análisis detallado a través de los casos de estudio, se buscan las mejores prácticas que den lineamientos claros a las medidas de restricciones de acceso, manejo territorial, tecnológicas e infraestructura para la solución de problemas que de alguna manera sean tratados para el contexto de Bogotá – Región.

A partir de establecer esta conexión entre casos de estudio y medidas adoptadas para resolver los problemas, se pueden identificar las tendencias, las mejores prácticas y los factores de éxito a la solución de los diferentes problemas del transporte urbano de carga. Aunque las soluciones encontradas responden a contextos particulares, estas experiencias dan antecedentes de éxito o fracaso en la implementación y pueden existir aproximaciones a contextos similares de países con aspectos sociodemográficos posiblemente cercanos a la realidad de Bogotá – Región.

3. *Selección y análisis de indicadores para cada categoría.* Una vez consideradas las mejores prácticas se establece los proyectos de distribución urbana y regional de mercancías en Bogotá Región reportados por fuentes oficiales, así como los indicadores de desempeño, para establecer que brechas se deben disminuir para alcanzar un desempeño logístico deseado a partir de las mejores prácticas internacionales documentadas. Para facilitar el análisis de los indicadores se considera la siguiente estructura, la normalización de los indicadores que pretende unificar las unidades de medida y simplificar la multidimensionalidad de la información. Para alcanzar este propósito se seleccionó la metodología de Distancia a una unidad de análisis, para precisamente medir la desviación de la línea base alrededor de la meta. La ecuación (1) permite la estimación de esta normalización define que  $y_{it}$  es el indicador  $i$  normalizado observado en el periodo  $t$ ,  $x_{it}$  el valor que toma el indicador  $i$  en el periodo  $t$  y  $x_{it}^m$  el valor de referencia del indicador  $i$ , para la meta  $m$ , en el periodo observado  $t$ . Esta metodología permite llevar al indicador a una escala (-1, 0, 1), con unidades de medida que puedan ser interpretados de forma más sencilla. La selección de esta metodología reconoce que, si el indicador ha cumplido el propósito toma el valor de 0 y si no, toma valores contrarios a cero. Entre otros aspectos se busca centralizar los valores a cero, su máxima distancia se interpreta como una brecha, aún no reducida.

$$y_{it} = \frac{x_{it}}{x_{it}^m} - 1 \quad (1)$$

Finalmente, para establecer una aproximación del estado de cada categoría propuesta se estima un Indicador Sintético. El objetivo principal de un indicador sintético es reducir aún más la complejidad del análisis estratégico, agregando varios indicadores normalizados a una sola categoría. Actualmente, existe un sin número de métodos para determinar un indicador sintético [13]. Entre los métodos señalados se distinguen la regresión lineal, la suma ponderada, AHP (Analytic Hierarchy Process), entre otros. Cada uno de estos métodos establece unos pesos para cada uno de los indicadores normalizados, es trabajo del tomador de decisiones establecer los pesos que se deben considerar a partir de información secundaria o las preferencias estratégicas; resultado de la implementación de las iniciativas consideradas.

Para este estudio se considera una suma ponderada de los indicadores en cada categoría de análisis, donde los factores de ponderación son iguales para todos los indicadores. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**,  $w_i$  es el valor de ponderación para el indicador  $i$  para el análisis se considera que  $w_1 = w_2 = \dots = w_n$ .

$$\bar{y}_{it} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{it} w_i|}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Es de aclarar que el análisis para determinar el factor de peso para ponderación de indicadores requiere de un trabajo exhaustivo y profundo para lograr definir las prioridades necesarias para alcanzar un impacto en el corto plazo. Este análisis no es del alcance de este estudio.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Selección de casos



Dentro de la búsqueda el marco de referencia que se construyó para analizar las variables que responden a la solución de problemas de las ciudades en temáticas de logística urbana se muestran en la Tabla 2, agregando características demográficas.

### 3.2 Identificación y clasificación de los casos dentro de las categorías seleccionadas

Las medidas establecidas anteriormente se analizan para los diferentes casos seleccionados, a partir de las mejores prácticas documentadas por cada uno de los casos que pueden ser consideradas por las autoridades de Bogotá Región y analizar su viabilidad de implementación. A continuación, se explica los resultados obtenidos para cada categoría referida como variables de análisis.

**Tabla 2.** Casos de estudio analizados

Fuente	Contexto	Aspectos Demográficos
Francia	La Rochelle	Total habitantes 74344, densidad 2614,98 hab/km <sup>2</sup>
	Strasbourg	Total habitantes 275 718 hab., densidad 3523,1 hab/km <sup>2</sup> , metropolitana 1 175 393 hab.
	Mónaco	Total habitantes 38400 hab., densidad 17821 hab/km <sup>2</sup>
	Bordeaux	Densidad urbana 851071, metropolitana 1 178 335 hab.
	Toulouse	Población total : 458 298 hab, Densidad: 3874,03 hab/km <sup>2</sup>
	Nanterre	Población total:93 509 hab.;densidad: 7670,96 hab/km <sup>2</sup>
	Nancy	Población: 105,067;densidad:7,000/km <sup>2</sup>
	Besançon	Población: 116,353;Densidad: 1,800/km <sup>2</sup>
	Paris	Población:2,229,621; Urbana:10,601,122; metropolitana:12,405,426
España		Censo 46 468 102 hab. (2016)2. Densidad 91,95 hab./km <sup>2</sup>
Barcelona		Población 1 608 746 hab. (2016). Densidad 15 748,86 hab./km <sup>2</sup>
TURBOLOG	Utrecht	Total 343 779 hab. Densidad 3442 hab/km <sup>2</sup> Metropolitana 640 000 hab.
	Belo Horizonte	Total 2 479 175 hab. Densidad 4 915 34 hab/km <sup>2</sup>
	Ciudad de México	Total 8 918 653 hab.4 Densidad 5966 hab/km <sup>2</sup> Metropolitana 20 892 724 hab.
	Santiago	Total 6 158 080 hab.3 Densidad 6 255 94 hab/km <sup>2</sup> Metropolitana 7 314 176 hab.
	Beijing	Total 21 516 000 hab. Densidad 1044 hab/km <sup>2</sup>
	Nueva York	Total 8 550 406 hab. Densidad 10 756 hab/km <sup>2</sup> Urbana 18 897 109. Metropolitana 22 085 649.
	Mumbai	Total 12 442 373 hab. Densidad 23,989 hab/km <sup>2</sup> Metropolitana 20,654,359 hab.

1. *Medidas de restricciones de acceso.* Dentro de las medidas usadas para solucionar problemas de congestión las restricciones que limitan el tráfico del transporte de carga, son regulaciones que dependen del lugar y el tipo de vía, así como del peso y la longitud del vehículo, con prohibiciones de tráfico de mercancías en algunos carriles, estas medidas se conocen por CIVITAS como de fácil implementación y son igualmente recomendadas por BESTUFS, su uso se reporta en Ciudad de México, Utrecht, Francia y Barcelona.

La utilización de sitios específicos de paradas es un proyecto de Strasbourg que busca la organización de la recolección y organización de las zonas urbanas. Las entregas son posibles a través de sistemas de tecnología de información que informa sobre el acceso del espacio para carga y descarga teniendo en cuenta una programación previa a una hora determinada (Barcelona, CIVITAS), los accesos viales con capacidad limitada utilizan la tracción manual facilitando la entrega de mercancías en tiendas (Francia), existe también servicios especializados de entregas a domicilio para personas mayores de edad y con limitaciones (Natarre). La entrega en horas valle o en horas no laborables se estimulan a través de incentivos (Nueva York).

Otro tipo de estrategias de mayor orden están asociadas con conseguir la colaboración para las entregas para garantizar la distribución ágil y ordenada de las mercancías (Barcelona). Finalmente, las medidas de restricción de acceso tienen un nivel de impacto económico, ambiental, en la salud y la seguridad como lo propone el estudio de transporte de carga de la comisión Europea [14].

2. *Medidas de manejo territorial.* El desarrollo de la infraestructura para logística urbana está relacionada con la ubicación de espacios que permiten el almacenamiento temporal y adicionalmente pueden servir a los centros históricos donde el acceso es limitado, los centros de distribución urbana para mercancías se planifican a través de la definición de Zonas Logísticas Urbanas (ZLU), donde además se asignan espacios para el estacionamiento, las actividades de carga y descarga para movimientos importantes de carga (Francia, Belo Horizonte). El impacto ambiental puede ser reducido a través del uso de instalaciones subterráneas para parqueo y actividades logísticas (Paris).
3. *Medidas tecnológicas.* En Europa la tendencia de la logística urbana presenta nuevos retos, se favorece el uso de vehículos con tecnologías limpias como eléctricos híbridos, e incentivando el uso de la infraestructura a este tipo de operadores logísticos (Francia). Los sistemas inteligentes de transporte dentro de contextos organizacionales permiten la reducción de inventarios, la entregas e-commerce, modelos de toma de decisiones para el manejo del transporte de carga son soluciones recomendadas por START (Short-Term Actions to reorganise Transport of Goods Project), TURBOLOG (Transferability of urban logistics concepts and practices from a worldwide perspective), CIVITAS (Cleaner and Better Transport in Cities) y CLIEGE (Clean Last Mile Transport and Logistics Management).

Otros escenarios como el caso de alimentos, los vehículos implementados para su distribución trabajan con gas natural y adoptan plataformas tecnológicas para optimizar la movilidad de transporte de carga. Estas plataformas tecnológicas generan programación y ruteo dinámico para reducir las distancias de viajes. Los objetivos son aumentar la capacidad de carga de vehículos, reducir el número de vehículos dentro del centro de la ciudad, aumentar la eficiencia de las entregas, acceder a información en tiempo real para un análisis de los costos externos y su impacto en la operación.

4. *Medidas de infraestructura.* En cuanto a medidas de infraestructura se consideran grandes áreas de terreno público, a veces con instalaciones intermodales. Una opción para disponer del espacio es alquilar para construir almacenes e infraestructuras de transbordo. Estos centros tienen doble función, ser los nodos de la red de transporte interurbano y los centros base para la distribución urbana. Estos pueden ser especializados dependiendo de las actividades económicas con mayor potencial de desarrollo, ya que se concentran en los polos industriales o clúster (Francia, España, Santiago de Chile, Beijing). Otras fuentes consultadas indican que el desempeño logístico es posible a través de la infraestructura, la tecnología y la utilización de los modelos matemáticos. La clasificación de la infraestructura, responde a la ubicación, complejidad, conectividad, el nivel de tecnología y capacidad de respuesta. En alimentos, como apoyo a las actividades de abastecimiento y distribución se instaura la localización estratégica de centro de distribución Urbana (CAAL) que cuenta con servicios en un espacio físico amplio para la comercialización de alimentos al por mayor. La centralización de la distribución proporciona una imagen más realista de la cantidad de residuos generados por la actividad logística de alimentos y la implementación de acciones para su reducción.

### 3.3 Selección y análisis de indicadores para cada categoría

1. *Medidas organizacionales y legislativas.* Para valorar las implicaciones positivas o negativas, se representan espacios destinados para lograr capturar un modelo de ciudad deseado (Tabla 3). Las fuentes secundarias contienen información acerca de la cuantificación de los indicadores para medir el posible estado del desempeño logístico en Bogotá Región, estos indicadores pretenden ser una fase fundamental como apoyo a la planeación estratégica, que implica la sinergia entre las organizaciones, los ciudadanos, las entidades públicas y los recursos disponibles.

**Tabla 3.** Valoración de Indicadores Medidas Organizacionales y Legislativas

Medida	Indicadores	Línea Base	Meta
1	Incentivar el nivel de servicio de los operadores logísticos frente a las necesidades de Bogotá - Región. Servicios Logísticos	5,93 [15]	9 [15]
2	Relación de vehículos vacíos en la ciudad	40% [16]	20% [17]
3	Número de desarrollos en zonas identificadas para el uso exclusivo de actividades logísticas Bogotá Región	2 [18]	130 [15]
4	Infracciones de vehículos de carga	6320 [19]	5056
5	Accidentabilidad en vehículos de carga	5838 [19]	4087
6	Participación de los costos logísticos de Bogotá - Región en el precio del producto por cadena de abastecimiento.	14,97% [15]	10%

De acuerdo con la información consultada y valorada como indicador sintético los indicadores más críticos en el estado actual comparado con las metas propuestas por otros estudios son la relación de vehículos vacíos que de acuerdo a la matriz O/D de 2015 ha aumentado en comparación con el informe de la ANDI presentado en el 2013. Además, el número de desarrollos en zonas identificadas para uso exclusivo de actividades logísticas en Bogotá Región de acuerdo a la Secretaria de movilidad existen en proyección 130 proyectos asociados con zonas logísticas ubicadas en la sabana de occidente de donde se conoce se están ejecutando dos proyectos de acuerdo al informe de UPZs desarrollado por la Universidad Nacional. En resumen, se puede decir que frente al escenario ideal los indicadores presentan un bajo desempeño y su mejora depende acciones que permitan la mejora significativa de los procesos de toma de decisiones en Bogotá Región.

2. *Medidas de restricciones de acceso.* Se muestran en la Tabla 4. En las medidas de acceso, se encuentra información para el distrito, donde se evidencia un deterioro de la calidad del aire ya que las metas propuestas por las diferentes entidades públicas no han sido logradas generando problemas de congestión, problemas de ruido y calidad del aire. Las externalidades tienen un impacto importante en la calidad de vida de los ciudadanos y las medidas de acceso no han cumplido con su disminución.

**Tabla 43.** Valoración de los indicadores para las medidas de restricción de acceso

Medida	Indicadores	Línea Base	Meta
1	Volumen diario de vehículos por corredor con mayor utilización	13200 [19]	10560 [20]
2	Emisiones CO2 por transporte de carga (Millones Ton/año.	25 [21]	19,5 [21]
3	Nivel de calidad del aire en zonas logísticas identificadas	39,9 [20]	100
4	Cumplimiento de normativo de ruido sector industrial.	40% [20]	100%

3. *Medidas de manejo Territorial.* Se observan en la Tabla 5. El diseño geométrico de las vías adaptadas por tipo de vehículo es un indicador que permite conocer como la infraestructura responde adecuadamente al tipo de

vehículos que circula por las vías, dentro de la revisión no se percibe un estudio donde se conozca un diagnóstico acerca de cómo las vías cumplen este indicador para facilitar el tránsito y la congestión de vehículos de carga en la ciudad. No se encuentra evidencia de las zonas de descarga administradas por el distrito que cuenten con las características de demarcación adecuadas bajo estándares internacionales que permitan la operación y que mejore el orden en las entregas en la ciudad, se reporta que la mayoría de las descargas de mercancías se hacen al lado de la vía, como se reporta en el diagnóstico de matriz O/D de 2015 por Steer Davis. En lo que tiene que ver con centros de plataformas logísticas, se identifica en estudios de la cámara de comercio de Bogotá, 4 ubicadas en Soacha, Sumapaz, Occidente, y segunda línea aeroportuaria. El estado de avance evidencia la de Soacha y Occidente en proceso de factibilidad.

4. *Medidas Tecnológicas.* De acuerdo a la encuesta nacional de logística de 2015 del Departamento Nacional de Planeación las empresas que se dedican a prestar servicios logísticos solo el 54,7% de ellas implementan tecnologías de trazabilidad y monitoreo de carga origen destino para facilitar la operación y lograr aumentar su eficiencia. Las entregas a tiempo para la región de acuerdo a la encuesta nacional de logística están alrededor de 77,3%, el aumento de este indicador puede generar mayor competitividad de la logística en la Región (Tabla 6).

**Tabla 44.** Valoración de los indicadores de medidas territoriales

Medidas	Indicadores	Línea Base	Meta
1	Número de centros logísticos urbanos microlocalizados bajo un enfoque de sostenibilidad (Menor impacto de ruido y contaminación).	0 [22]	4 [23]
2	Número de proyectos de operación de distribución urbana con bajo impacto ambiental	2 [23]	4 [23]
3	Número de zonas de cargue y descargue públicas, señalizadas y adaptadas al tipo de vehículo e infraestructura de recibo de mercancías.	0	2729
4	Cumplimiento de diseño geométrico de vías en relación con el tipo de vehículo de carga.	0	100%
5	Volumen de tráfico ( número de vehículos que transitan corredor en un periodo de tiempo)( millones)	150	120
6	Tiempo de cargue y descargue (min)	60	40
7	Tiempo de viaje( ingreso a la ciudad)(min)	90	75

**Tabla 45.** Valoración indicadores para medidas tecnológicas

Medidas	Indicadores	Línea Base	Meta
1	Nivel de implementación de tecnología de trazabilidad de origen destino.	54,70% [15]	80%
2	Respuesta eficiente al consumidor ECR. Entregas a tiempo.	77,30% [15]	90%

5. *Medidas de Infraestructura.* Los indicadores de las medidas de infraestructura, tienen unos resultados poco favorables ya que la conectividad y la calidad de las vías que afronta Bogotá Región tiene un estado deficiente. Como lo muestran diferentes resultados de estudios desarrollados para Bogotá Región (Tabla 7).

**Tabla 46.** Valoración de indicadores para Medidas de Infraestructura

Medidas	Indicadores	Línea Base	Meta
1	Nivel de calidad y servicio del corredor vial en buen estado de Bogotá Región.	44% [24]	100%
2	Nivel de conectividad de los nodos logísticos urbanos con la infraestructura Regional ( Conectividad intermodal)	6,32 [15]	10
3	Velocidad de transporte de carga ( km/hr)	13 [19]	60[25]

## 6. CONCLUSIONES

Las ciudades analizadas para los casos de estudio con población entre 38.000 y 2.500.000 habitantes tienen un desarrollo importante en actividades logísticas urbanas y a su vez en medidas avanzadas de gestión de carga, incluyendo estrategias de incorporación de sistemas de información y comunicaciones para lograr el eficiente desempeño de la actividad de abastecimiento en toda su dimensión, estas soluciones tienen un alto impacto en el tiempo de entrega de las mercancías, la productividad y accesibilidad física y de servicios. El desarrollo de esta infraestructura conduce obligatoriamente al aumento de la capacidad de respuesta y por tanto competencias científicas, tecnológicas, capital humano, y posicionamiento competitivo. Aunque los problemas persisten en términos de impacto ambiental, las mejores prácticas documentadas indican una estructura organizacional robusta de infraestructura y servicios de abastecimiento y logística.

Ciudades con características demográficas similares a las de Bogotá donde su número total de habitantes, está en el orden de 8.080.734 y una población aproximada Bogotá- Sabana de 9.205.125 Habitantes, puede compararse con Santiago, Beijing, Nueva York , Mumbai, Ciudad de México, las cuales utilizan en mayor proporción medidas de restricción de acceso como: Corredores cero emisiones, regulaciones de circulación, programas de emisión de gases, incentivos gubernamentales en entregas en horas valle, uso de sistemas de transporte público de pasajeros para entregas de comidas. Mientras que las medidas de manejo territorial, están concentradas en la administración de las zonas de cargue y descargue de mercancías. Por otro lado, las medidas de infraestructura son estrategias de interés para Santiago y Beijing. Aunque las características son similares en número total de habitantes con Bogotá – Región, estas ciudades cuentan con un mayor número de estrategias para medidas de restricción, y reportan un desempeño

logístico superior. Cada ciudad es diversa en términos de cultura, historia, aspectos económicos y prácticas de LU (Logística Urbana). Es necesario tener el contexto de cada ciudad en la implementación de las soluciones.

La literatura muestra que las ciudades que han hecho partícipes a los organismos privados en el diseño de políticas públicas, más fácilmente encuentran el apoyo y aceptación de los actores del sistema. Las autoridades pueden apoyar las diferentes soluciones propuestas, pueden subsidiar y facilitar la consecución de infraestructura.

Los Sistemas de Abastecimiento y Distribución de alimentos no difieren de las estrategias propuestas para la logística urbana. Se diferencia solamente en propuestas centradas al diseño de la instalación y el transporte de carga para prestar los servicios adecuados y disminuir los efectos negativos generados de la manipulación inadecuada de los alimentos.

Finalmente, considerando el desempeño de los indicadores revisados para Bogotá Región en diferentes reportes de carácter público y privado. Se establece que la distancia al escenario ideal es significativa para las medidas de manejo territorial esto se debe a que existe infinidad de diagnósticos de la logística y abastecimiento de la Región pero no existe evidencias de la implementación de las iniciativas propuestas por estos estudios, las medidas organizacionales y legislativas muestran un bajo desempeño debido a no conseguir por el momento la integración de los municipios y Bogotá, lo que genera disparidades en la normatividad, no se evidencia aun incentivos y claros ejercicios de colaboración y cooperación.

La infraestructura es un reto importante para Bogotá Región, pero está rezagada por la baja calidad de las vías actuales y retrasos en la implementación de futuros proyectos para mejorar la conectividad. En cuanto a las restricciones de acceso, la calidad del aire y el ruido son un problema que va en aumento en el distrito y el impacto de la carga de mercancías puede incidir de manera negativa en la calidad de vida. Por otro lado, la tecnología es implementada por los operadores logísticos privados, pero aún no hay implementaciones por el Distrito para la lograr la eficiencia del abastecimiento y la logística en la Región.

## REFERENCIAS

- [1] Crainic, T. & Montreuil, B. (2016). Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics. *Transportation Research Procedia* 12, 383-398.
- [2] Muñuzuri, J. et al. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities* 22(1), 15-28.
- [3] Macário, R., Galelo, A. & Martins, P. (2008). Business models in urban logistics. *Ingeniería & desarrollo* 24, 77-96.
- [4] Wagner, T. (2008). Logistics land use - A buffer between harbour areas and urban neighbourhoods? *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing* 2, 107-115.
- [5] Muñuzuri, J. et al. (2012). City logistics in Spain: Why it might never work. *Cities* 29(2), 133-141.
- [6] Gérardin, B. & Conseil, G. (2007). Dix ans d'expérimentations en matière de livraisons en ville: premier bilan critique. *Certu*.
- [7] Cochrane, K. et al. (2017). Moving freight on public transit: Best practices, challenges, and opportunities. *International Journal of Sustainable Transportation* 11(2), 120-132.
- [8] Taniguchi, E., Thompson, R. & Yamada, T. (2014). Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 125, 4-14.
- [9] Taniguchi, E., Thompson, R. & Yamada, T. (2003). Predicting the effects of city logistics schemes. *Transport Reviews* 23(4), 489-515.
- [10] OECD (2013). Delivering the goods. 21st century challenges to urban goods transport. In *Internatiotal Transport Forum*.
- [11] Morganti, E. (2011). Urban food planning and transport sustainability: A case study in Parma. In *European Association of Agricultural Economists - EAAE PhD Workshop*.
- [12] Liñán, A., Legnani, N. & Salinas, P. (2008). El método comparativo: fundamentos y desarrollos recientes Documento de Trabajo # 1. *Política Comparada*.
- [13] Fernández, P. & Sánchez R. (2007). Propuesta metodológica para el diseño de un índice sintético de turismo sostenible. *Papers de turismo*.
- [14] MDS transmodal Limited (2012). DG MOVE European Commission : Study on Urban Freight Transport. Final report.
- [15] SNCCTI (2015). <http://www.colombiacompetitiva.gov.co>.
- [16] Steer Davies Gleave (2015). Actualización y ajuste de la matriz origen destino del transporte de carga en la ciudad de Bogotá D.C. *Secretaría Distrital de Movilidad*.
- [17] Cámara de Comercio de Bogotá (2013). Impactos de medidas de regulación de carga urbana en Bogotá. *Alcaldía de Bogotá*.
- [18] UNAL (2014). Informe de Infraestructura. *Universidad Nacional de Colombia*
- [19] Cámara de Comercio de Bogotá (2015). Logística en Bogotá - Región. Información del desempeño logístico. *Alcaldía de Bogotá*.
- [20] INVIAS (1993). Manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles. *Instituto Nacional de Vías*.
- [21] MIN Ambiente (2014). Productos analíticos para apoyar la toma de decisiones sobre acciones de mitigación a nivel sectorial. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
- [22] SIMUR (2018). [movilidadbogota.maps.arcgis.com](http://movilidadbogota.maps.arcgis.com).
- [23] Invest in Bogotá (2015). Perspectiva de la logística para Bogotá Región. *Alcaldía de Bogotá*.
- [24] IDU (2015). Informe IDU. *Instituto de Desarrollo Urbano*.
- [25] BID (2013). Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos. *Banco interamericano de Desarrollo*.

# Prácticas de referencia de Laboratorios de Innovación: Una revisión sistemática de literatura en la última década

Evely D. Hernández M.<sup>1</sup>

María C. Ferreira M.<sup>2</sup>

Lizeth Serrano C.<sup>3</sup>

Universidad Católica de Colombia  
Bogotá – Colombia

El principal objetivo de esta investigación es contribuir en la identificación de tendencias prácticas aplicadas en Laboratorios de innovación a nivel mundial, a su vez, estudiar los conceptos de *Innovación* y *Laboratorio de innovación* a través de la contribución de diferentes autores registrados en la literatura y finalmente, identificar el impacto de contar con estos espacios creativos en las comunidades académicas. La metodología que siguió esta investigación fue la revisión sistemática de literatura sobre el tópico en los últimos diez años, como resultado, se identificó un conjunto de 97 prácticas clasificadas en 5 dimensiones: contar con equipos multidisciplinarios de trabajo colaborativo, desarrollar programas de emprendimiento, diseñar metodologías creativas, establecer redes de valor y desarrollar formación teórico-práctica. Los principales resultados muestran que este conjunto de prácticas ha promovido el logro de resultados satisfactorios en los laboratorios de innovación por parte de las universidades más reconocidas a nivel mundial, el estudio demostró la importancia de contar con laboratorios de innovación para fomentar una cultura de colaboración y transformación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La innovación es una habilidad orientada a la transformación continua del conocimiento y las ideas [1]. Se ha considerado como una vía para incrementar la productividad y el crecimiento económico en las empresas, localidades, regiones y países que la impulsan [2]. Actualmente existen espacios orientados a fortalecer capacidades de innovación y emprendimiento [3] a los que se les denomina *Laboratorios de innovación*, siendo éstos conformados por una comunidad donde diferentes conceptos florecen y las ideas son generadas [4], éstos cuentan con una metodología de trabajo interdisciplinar que permite transformar la realidad a través de la generación de ideas mediante la participación de diferentes actores desde sus conocimientos, experiencias, perspectivas y vivencias. [5]

Para potenciar habilidades creativas, alrededor del mundo se han desarrollado estrategias para crear espacios físicos donde a través del prototipado, la prueba y la interacción, se motive a la producción de ideas y al intercambio de conocimiento [5]. Los primeros ejemplos de Laboratorios de innovación en entornos académicos se encuentran en The University of British Columbia, Vancouver y The University of Manchester. En estos laboratorios universitarios, la investigación y la educación se fomentan mediante el uso del campus y sus instalaciones para desarrollar y probar soluciones en tiempo real [6]. Otro aspecto importante en los laboratorios de innovación es la temática social. La investigación de Ñayes, Ramírez y García [7] exponen que el interés demostrado por parte de los ciudadanos con respecto a éstos ha ido creciendo de forma paulatina. Sin embargo, a pesar de que ha sido importante la elaboración de laboratorios de innovación alrededor del mundo, este proceso de ideación debe contextualizarse de acuerdo con las capacidades de cada país y de cada organización.

Teniendo esto en cuenta y entendiendo que la academia es la semilla de una sociedad competente, es un reto importante reformar las formas de pedagogía, una pedagogía que ha permanecido estática través del tiempo, donde su uniformidad no ha tenido en cuenta las habilidades particulares de cada persona, perjudicando así el pensamiento creativo, innovador y crítico de cada individuo. La creatividad es fundamentalmente incompatible con la uniformidad y estandarización de los productos de la escuela-fábrica [8]. Totorica [9] manifiesta: *Hoy en día, las sociedades demandan formas colaborativas de trabajo, con el propósito de construir una visión-acción común para resolver problemas públicos complejos con una mentalidad transformadora*. Teniendo en cuenta que la proximidad de las empresas, las universidades y el gobierno facilita la transferencia de conocimiento e innovación, se identifica la necesidad en la academia de crear espacios colaborativos generadores de ideas y nuevas formas de enseñanza, donde la teoría se vea reflejada en la práctica.

Este documento tiene como objetivo, presentar la investigación realizada por medio del análisis de los artículos científicos complementados con la revisión de contenido web, para identificar prácticas de referencia de laboratorios de innovación a nivel nacional e internacional. La revisión de literatura realizada permitió dar respuesta a tres objetivos de investigación: estudiar la conceptualización de *Innovación* y *Laboratorio de innovación* por medio del aporte de diferentes autores registrados en la literatura, identificar las tendencias de las prácticas aplicadas en los laboratorios de innovación estudiados, e identificar su importancia en la comunidad académica.

---

<sup>1</sup> edhernandez11@ucatolica.edu.co

<sup>2</sup> mcferreira58@ucatolica.edu.co

<sup>3</sup> lfserranoc@ucatolica.edu.co

## 2. MÉTODO

Brereton y otros [10] plantean que, para realizar una revisión sistemática de literatura, se deben desarrollar una serie de actividades divididas en las siguientes etapas: planificación, ejecución y documentación.

1. *Planificación*: esta etapa permite identificar y hacer explícita la necesidad a la que responde la investigación. Implica definir una pregunta de investigación, desarrollar un protocolo de búsqueda y validar dicho protocolo con un panel de expertos. En esta etapa se especifica la o las preguntas de investigación a abordar, se determina una estrategia de búsqueda que sea apropiada para dicha pregunta determinando el proceso de selección de los estudios primarios, es importante desarrollar un protocolo de revisión, donde se especifiquen los métodos que se utilizarán en la revisión que incluye, por ejemplo, establecer los datos que deben extraerse de los estudios, las condiciones a aplicar cuando se seleccionan dichos estudios, las métricas de calidad que se aplicarán a los mismos y la asignación de revisores a actividades particulares.
2. *Ejecución*: una vez que el protocolo se define y la revisión sistemática entra en la fase de ejecución, se debe ejecutar la estrategia de búsqueda definida en dicho protocolo. Es necesario buscar varias fuentes electrónicas diferentes; ninguna fuente única encuentra todos los estudios primarios. El título y el resumen de los estudios identificados por las búsquedas iniciales son revisados (preferiblemente por al menos dos investigadores) y los documentos irrelevantes son rechazados. Es importante evaluar la calidad de los estudios primarios para apoyar el proceso de inclusión / exclusión y la asignación de ponderación a estudios específicos durante la etapa de síntesis de datos. No existen definiciones universales de la calidad del estudio, pero se ha sugerido que la calidad se relaciona con la medida en que se minimiza el sesgo y se maximiza la validación externa e interna. El objetivo de esta etapa es utilizar formularios de extracción de datos para registrar con precisión la información que se obtiene de los estudios primarios. Para reducir la oportunidad de sesgo, los formularios de extracción de datos deben definirse y probarse cuando se define el protocolo de estudio. Una vez se han extraído los datos, se deben sintetizar de una manera adecuada para responder a las preguntas de revisión.
3. *Documentación*: al ser completada la revisión sistemática y dar respuesta a la o las preguntas de investigación, se documentan los hallazgos de la revisión sistemática. Se sugiere consolidar un informe como resultado del proceso.

Una revisión sistemática de literatura se desarrolla de diferentes formas de acuerdo con el contexto. En la Tabla 1, se muestran algunas de las metodologías propuestas por diferentes autores para la realización de este ejercicio.

**Tabla 1.** Metodologías propuestas por diferentes autores para la realización de una revisión sistemática de literatura

Autor	Metodología
[11]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Detectar de la literatura y otros documentos.</li> <li>2. Obtener de la literatura: seleccionar aquellas que serán de utilidad para el marco teórico.</li> <li>3. Consultar de la literatura.</li> <li>4. Extraer y recopilar la información de interés en la literatura</li> </ol>
[12]	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Realizar una pregunta de revisión de literatura.</li> <li>6. Seleccionar un método evaluación y análisis de la literatura.</li> <li>7. Presentación de los resultados y temas incorporando la evaluación crítica de los estudios incluidos.</li> <li>8. Discutir resultados y recomendaciones</li> </ol>
[13]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seleccionar un pequeño número de lecturas y organizarse para obtener el máximo beneficio.</li> <li>2. Elegir fuentes de información adecuadas (informes científicos, entrevistas con especialistas, publicaciones de organismos especializados, entre otros).</li> <li>3. Consultar bibliografías consideradas en los repertorios especializados</li> <li>4. Realizar síntesis de la información seleccionada</li> </ol>
[14]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fase de planeación de la revisión: definir la pregunta de investigación y objetivos.</li> <li>2. Fase búsqueda de información en bases de datos y literatura.</li> <li>3. Fase de identificación de información clave y de carácter científico.</li> <li>4. Fase de evaluación: evaluar la información por su aporte, validez y relevancia a la investigación.</li> <li>5. Fase de síntesis: identificar las dimensiones del problema de investigación e integrar por grupos los datos clave.</li> <li>6. Fase de Recomendaciones: integrar los hallazgos a la contribución de entornos de competencia o de investigaciones futuras</li> </ol>
[15]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definir los objetivos de la revisión.</li> <li>2. Realizar la búsqueda bibliográfica o consulta de bases de datos y fuentes documentales. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Establecimiento de la estrategia de búsqueda.</li> <li>▪ Especificación de los criterios de selección de documentos.</li> </ul> </li> <li>3. Organización de la información.</li> <li>4. Redacción del artículo</li> </ol>

En esta investigación se llevó a cabo la metodología de revisión sistemática de literatura fundamentada en la propuesta por Bereton [10] con el propósito de dar respuesta a las preguntas de investigación que direccionaron esta investigación. Dicha revisión sistemática se realizó a partir de artículos científicos y páginas web, los primeros con el fin de obtener un soporte teórico académico y el segundo, para conocer directamente de las páginas de los Laboratorios a qué se dedican éstos. Brereton en los últimos años se ha centrado en la adopción y adaptación de la metodología de revisión sistemática dentro del dominio de la ingeniería de software [10]. La revisión sistemática es una metodología que pretende ser fiable, exhaustiva, y auditable para permitir a los investigadores reunir fundamentos sobre una pregunta de investigación, área de asunto o tema de interés [16]. Esta metodología de revisión sistemática se ha aplicado en el desarrollo y validación de un protocolo de revisión para obtener criterios de inclusión

y exclusión para la extracción de datos. Brereton ha publicado y participado en más de veinte artículos y es coautor de un reciente libro publicado acerca de Ingeniería de Software basada en evidencia y revisiones sistemáticas.

De acuerdo a la metodología propuesta por Brereton [10], a continuación, se describe la forma en que se llevó a cabo cada una de las tres etapas de la revisión: planificación, ejecución y documentación. En la etapa de planificación, se establecieron las preguntas de investigación: ¿Cómo se ha conceptualizado la Innovación y Los Laboratorios de innovación en la literatura? ¿Cuáles son tendencias en las prácticas aplicadas en los laboratorios de innovación estudiados? ¿Por qué son importantes los laboratorios de innovación en la comunidad académica? Se diseñó la estrategia de búsqueda para la obtención de literatura, estableciendo a ScienceDirect, IEEE y Scopus como bases de datos para obtener artículos científicos. Para el protocolo de búsqueda de la revisión literaria, se determinaron las ecuaciones de búsqueda, palabras clave y una serie de criterios de inclusión y exclusión evaluados por medio de cada filtro. En la Tabla 2, se muestran los parámetros anteriormente nombrados.

**Tabla 2.** Parámetros revisión de la literatura

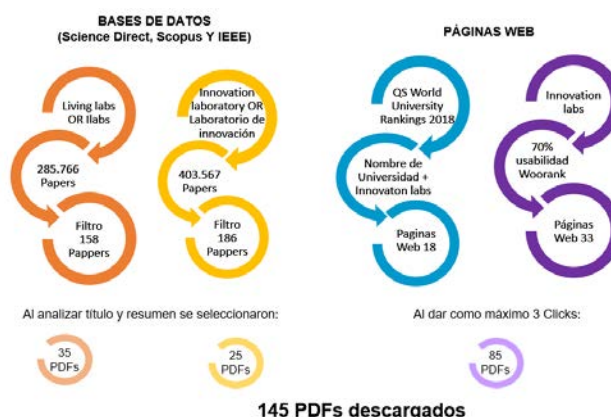
Bases de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ScienceDirect, Scopus, IEEE</li> <li>▪ Living labs or labs or llabs</li> <li>▪ Innovation laboratory or Laboratorios de innovación.</li> </ul>
Palabras Clave	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Innovation, Living labs, lLabs, Innovation center, Co-creation labs, Innovation laboratory, Open innovation labs, Laboratorios de co-creación, Laboratorios de innovación, Innovación, Plataformas de innovación abierta</li> </ul>
<b>Filtro</b>	
Tipo de documento	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Journals, Open Access</li> </ul>
Ventana de tiempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Documentos desde el 2008 al año 2018</li> </ul>
Sección analizada para inclusión y exclusión	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Título y resumen</li> </ul>

En cuanto al análisis de páginas web, se incluyeron las páginas de las universidades que se identificaron en el top 10 de tres rankings y que, a partir de la búsqueda con una ecuación establecida, contaran con un laboratorio de innovación. Adicionalmente a los laboratorios elegidos a través del ranking, se seleccionaron otros destacados donde sus páginas web cumplieran con un criterio de usabilidad analizado a través de un software de tráfico de datos. Se definió la cantidad máxima de clicks a dar dentro de cada página web, y finalmente, se descargaron los PDFs necesarios para su posterior análisis. En la Tabla 3 se detallan dichos parámetros.

**Tabla 3.** Parámetros revisión web

Parámetros	Descripción
Criterio 1	Ranking QS World University Rankings 2018
Filtros en el ranking	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Top 10 a nivel mundial</li> <li>▪ Top 10 a nivel Latinoamérica</li> <li>▪ Top 10 a nivel Colombia</li> </ul>
Ecuación	Nombre de universidad + "Innovation labs"
Criterio 2	Mínimo 70 % de usabilidad
Software	Woorank para tráfico de datos
Ecuación	"Innovation labs" or "innovation center"
Clicks en Pág. Web	Se dieron máximo 3 clicks por página

En la etapa de ejecución, se realizaron las sub etapas de consulta de la literatura seleccionada y extracción de la información, para éstos se tomaron como referencia: bases de datos, ecuaciones de búsqueda y los filtros mencionados anteriormente, dando como resultado un total de 70 artículos revisados. Respecto a la revisión de páginas web, se revisaron 45 páginas de laboratorios, siguiendo los parámetros establecidos para la revisión. De estas páginas se descargaron 85 PDFs para su respectivo análisis. Los documentos descargados en PDF se procesaron en el software MAXQDA, el cual es utilizado para analizar, codificar y sintetizar la información, allí se crearon 25 nodos acumuladores de información seleccionada. Este proceso se muestra de forma gráfica en la Figura 1. Finalmente, en la etapa de documentación, se realizó el análisis de los 145 PDFs descargados para estudiar su pertinencia respecto a los objetivos de investigación y se consolidó la información en la que se fundamenta el presente capítulo.



**Figura 1.** Proceso de obtención de PDFs para la revisión de artículos científicos y páginas web



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Conceptualización de Innovación y Laboratorios de innovación en la literatura

- *Innovación:* Para Cocu, Pecheanu y Susnea [17], la innovación surge a través de la conglomeración de personas en un entorno social, con el fin de establecer ideas y compartir conocimientos para la solución de un problema determinado en distintos escenarios sociales y económicos que hacen referencia a la cohesión de factores educativos, laborales, ingenieriles y de otras ramas del saber. Desde una perspectiva más comercial, Mavridis [18], Gee [19], OECD [20], Pavon y Goodman [21] convergen en la idea de que la Innovación es el desarrollo de nuevos o mejores productos (bienes o servicios) que crean valor al cliente, proceso generado a partir de una idea, invención o reconocimiento de una necesidad. Siguiendo esta corriente, Drucker [22], resalta que el proceso innovador, sale a la luz tras un emprendimiento que puede provenir de cualquier persona que tenga el ímpetu necesario para contribuir desde cualquier lugar al aspecto económico y social.

En cuanto a buenas prácticas en innovación para el gobierno y la gestión de universidades, Rubio [23] establece que éstas se fundamentan en la docencia, la investigación y la gestión. De acuerdo con la metodología, se infiere que la innovación radica en un fuerte énfasis en la formación, sin embargo, el proceso correcto debe comenzar por la investigación, dado que, a partir de ésta, se crean los argumentos y las ideas necesarias para ser ratificadas en el proceso de aprendizaje, que no solo se basa en que los estudiantes aprendan, sino, que los profesores también lo hagan, con el objetivo de abrir un ambiente de intercambio de conocimientos. Dando paso a la estrategia de innovación abierta (OI por sus siglas en inglés), la cual se fundamenta en la percepción de los recursos internos por parte de las organizaciones y la colaboración de aliados estratégicos en el proceso de desarrollo e investigación de los productos. En el ámbito social, para la comisión europea [24], la Innovación, es sinónimo de producir, asimilar y explotar con éxito una novedad, de forma que aporte soluciones inéditas a los problemas y permita responder a las necesidades de la sociedad. Postulado que concuerda con Hernández y Pérez [25], que tratan a la innovación como un aspecto que puede ser usado para enfrentar los problemas relativos a la inequidad y el crecimiento económico que se evidencia en los países subdesarrollados, en contraste con esto, el panorama de la innovación es diferente en los países desarrollados como Estados Unidos, Japón y los pertenecientes a la Unión Europea, en los que se identifica que el crecimiento económico aumenta de forma constante.

- *Laboratorio de Innovación:* según Global Science & Technology [4], ITM [3], Totorica [9], Pinto y Pedruzzi [26], el laboratorio de Innovación es un espacio donde se presenta la participación de múltiples actores, generando una comunidad donde las ideas son generadas a través de la colaboración [3]. Teniendo como propósito el diseño de soluciones derivadas de la interacción interdisciplinaria [27], en el que las partes interesadas (universidades, empresas, organizaciones, investigadores, entidades gubernamentales, miembros de la comunidad y los clientes o usuarios finales) [28] colaboran para trabajar juntos en la creación, validación y prueba de nuevos servicios, ideas comerciales, mercados y tecnologías en la vida real [29]; en otras palabras, los laboratorios vivos son estructuras abiertas [30].

Son conducidos por dos ideas principales: primero, involucrar a los usuarios como co-creadores en igualdad con el resto de los participantes y segundo, experimentar en la configuración del mundo real [31]. Los laboratorios de innovación persiguen innovaciones disruptivas y están llamados a *imaginar lo imposible* [32]. Se ponen en escena ideas, iniciativas y proyectos que transforman e implementan para lograr un cambio positivo e incluyente [5] en un entorno en el que el contexto cotidiano y las necesidades del usuario estimulan y desafían tanto la investigación como el desarrollo [33]. De acuerdo con la Red Europea de Living Labs (ENoLL), un Living Lab es impulsado por cuatro elementos principales: co-creación, exploración, experimentación y evaluación [34]. Estos espacios son relevantes porque tienen como objetivo fortalecer capacidades de innovación y emprendimiento [34]. Son una forma de organizar la experimentación colaborativa y la co-creación con usuarios reales en entornos reales [35,36,37]. Las actividades que se generan en estos espacios se consideran un cultivo de ideas de valor, donde existe margen para el ensayo y la creatividad, y así crear una cultura de experimentación fundamentada en la innovación [27]. Es importante tener en cuenta que estos ecosistemas innovadores funcionan de forma eficiente cuando se gestiona dentro de un enfoque de liderazgo horizontal [30].

#### 3.2 Prácticas implementadas por laboratorios de innovación a nivel mundial

Con la revisión de literatura se identificaron un total de 97 prácticas, de las cuales 55 son aplicadas a nivel internacional, representando el 51% del total de prácticas. 23 a nivel nacional, siendo éstas un 22% y 29 aplicadas en los dos contextos, representando un 27% de total de las mismas. Del total de prácticas identificadas, 43 son aplicadas en universidades internacionales, representando así, el 84% del total analizadas. Los laboratorios de innovación analizados a nivel nacional e internacional convergen en ciertas prácticas que permiten ser agrupadas en 5 grandes tendencias: contar con equipos multidisciplinarios de trabajo colaborativo, desarrollar programas de emprendimiento, diseñar metodologías creativas, establecer redes de valor, desarrollar formación teórico-práctica.

- *Contar con equipos multidisciplinarios de trabajo colaborativo:* una de las principales tendencias encontradas en el contenido web fue la premisa de desarrollar espacios de trabajo colaborativo donde independientemente de las diferencias de poder institucional, todos se traten mutuamente como iguales para el intercambio de conocimiento

y experiencias sobre temáticas relevantes y puntuales en el campo de la innovación, permitiendo que soñadores interactúen con participantes de diferentes disciplinas para investigar y explorar. Humanizando así los procesos, alentando la inclusión, la diversidad, y conectando a las personas entre sí al permitir que los usuarios dejen de ser receptores pasivos de acciones institucionales, para pasar a convertirse en protagonistas y productores de sus propias soluciones.

- *Desarrollar programas de emprendimiento:* un gran número de laboratorios cuentan con prácticas orientadas al desarrollo de programas de emprendimiento para sus usuarios, unos, se orientan a animar a los estudiantes a seguir desarrollando sus ideas en una incubadora de proyectos durante el periodo académico o estaciones específicas del año (en países que cuentan con éstas), recibiendo apoyo y orientación de mentores y asesores. Otros a realizar convocatorias de proyectos de innovación y emprendimiento para brindar acompañamiento en todas las fases a través de programas de coaching. Para esto es importante contar con un comité de expertos que evalúen las propuestas presentadas por los participantes en diferentes ámbitos de innovación. También se orientan a brindar apoyo para la creación de spin-off, a través de la transferencia de capacidades de innovación a las empresas (grandes, medianas, pequeñas y micros) a través del diseño de estrategias y soluciones de gestión.
- *Diseñar metodologías creativas:* brindar a los participantes las herramientas para aprender a pensar de forma innovadora, es fundamental para llegar a soluciones poco convencionales e impactantes, herramientas que sirvan como guías de inspiración para desarrollo de iniciativas. La incorporación de inteligencia artificial en las experiencias de laboratorios, ofrecer viajes o *bootcamps* para ubicar a los estudiantes en entornos menos estructurados para aprender haciendo, ofrecen ciclos de cine para inspirar la capacidad creativa, entre otros servicios, representan un plus importante en estos espacios creativos. De las metodologías más desarrolladas en los laboratorios de innovación es la metodología de *Design Thinking* en la construcción de proyectos, gracias a su orientación al trabajo colaborativo.
- *Establecer redes de valor:* las redes de valor son fundamentales en el desarrollo de los laboratorios de innovación para establecer alianzas nacionales e internacionales dentro de la investigación mundial, el desarrollo de productos y el espíritu empresarial. Los laboratorios buscan trabajar en red para establecer vínculos con figuras de negocios con experiencia. Esta práctica busca relacionar a soñadores con empresas de primer nivel y nuevas empresas para que compartan sus experiencias y aprendizajes a través de visitas y retos propuestos por éstas y así permitir al participante potenciar sus habilidades y ampliar su conocimiento. Es importante construir un lugar donde altos ejecutivos y líderes empresariales recurran para obtener orientación basada en evidencias en proyectos de innovación en sus organizaciones, regiones locales y naciones. Contar con redes de confianza les genera credibilidad y apertura a los laboratorios de innovación.
- *Desarrollar formación teórico-práctica:* los laboratorios están generalmente ligados a la exploración y al optar por el principio de aprender practicando por medio de la aplicación de retos con un impacto en el entorno desde la ideación hasta el prototipado, encaminados en la resolución de una problemática en particular. Muchos de los laboratorios estudiados, establecen también, programas temporales para que personas con talento trabajen en solucionar retos reales propuestos por empresas aliadas. El desarrollar soluciones tangibles, no solo ideas, es fundamental para buscar mantenerse activos a lo largo de todo el proceso de innovación al ir más allá de la etapa de ideación.

### 3.3 Importancia de los laboratorios de innovación en la Educación Superior

El proceso de innovación de éxito suele ser impulsado por el aprovechamiento de las conexiones personales [30], éste es un determinante muy fuerte de los patrones de interacción, puesto que las personas son más propensas a comunicarse con aquellos que están ubicados más cerca de ellos [38]. Actualmente, los estudiantes necesitan que se les recuerde repetidamente y se les muestre cómo ser creativos, para cuestionar sus propias suposiciones e imaginar otras posibilidades a través de distintos puntos de vista [8].

La Creatividad no puede ser considerada como un don natural de determinados individuos, es necesario fomentar una mayor confianza en la capacidad creativa de los estudiantes, que les permita obtener las habilidades necesarias para generar nuevas ideas que tengan un impacto en el entorno. El despliegue de esta capacidad no solo depende de factores cognitivos; depende de emociones, motivaciones, historias de vida, contextos particulares, entre otros [27]. por esto, el enfoque del laboratorio viviente es cada vez más popular entre las universidades, porque se enfatiza el monitoreo y el aprendizaje que ofrece un marco para conectar a los estudiantes con la investigación aplicada [39] y brinda la oportunidad de ampliar y potenciar la base de conocimientos y el conjunto de habilidades particulares de cada individuo [40], dado que la mejor manera de aprender es resolver un problema del mundo real con un mentor u otros codificadores entusiastas [41].

Con relación a lo anterior, es necesario desarrollar espacios físicos que fomenten la innovación dentro de las universidades donde se estimule la creatividad y se provea un ambiente inclusivo donde participen profesionales líderes con experiencia dentro y fuera del sector público, buscando una interacción multidisciplinar para atender las problemáticas y proyectos que se presenten, creando así una interacción directa entre el sector académico, empresarial y las problemáticas sociales que surgen a nivel nacional.

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis de los artículos complementados con la revisión de contenido web, fue un método que facilitó el entendimiento de los conceptos de *Innovación* y *Laboratorio de innovación*, sin embargo, a pesar de los planteamientos de diferentes autores al respecto, no se llega a una premisa que los defina de manera exacta, no obstante, gracias al amplio registro de los mismos, se identifican convergencias en que la *Innovación* es una fuerza impulsadora del cambio de lo rutinario a lo extraordinario a través del talento de soñadores y que los *Laboratorios de innovación* necesitan de un espacio de interacción interdisciplinar para compartir ideas, fomentar una comunidad creativa y empoderar el talento de soñadores a través de la investigación y la exploración.

En cuanto a las prácticas identificadas y documentadas, se reconocen la mayoría aplicadas en universidades reconocidas a nivel mundial, la mayor representación de dichas prácticas está orientada a la definición de servicios específicos, sin embargo, se encontraron pocas prácticas enfocadas a temas de costos e ingresos de los laboratorios o centros de innovación. Adicionalmente, se identificó que gran parte de las prácticas aplicadas a nivel internacional, también se emplean actualmente en el contexto nacional de la innovación, adjudicándose en su mayoría a universidades que se han propuesto generar un impacto positivo en la sociedad. La identificación de convergencias entre las prácticas aplicadas por los laboratorios de innovación analizados, permitieron ser agrupadas en 5 grandes tendencias: contar con equipos multidisciplinarios de trabajo colaborativo, desarrollar programas de emprendimiento, diseñar metodologías creativas, establecer redes de valor, desarrollar formación teórico-práctica. Sin embargo, la literatura es escasa en términos de qué tipo de infraestructura puede ser implementada en dichos espacios creativos.

Es fundamental contar con un espacio donde se brinde un servicio humanístico y con un equipo de trabajo que esté comprometido y alienado con los objetivos de éste, que entienda y comparta los mismos valores, la misma visión, y haga parte de una misión que le permita al laboratorio proyectarse a largo plazo por medio del enfoque de las diferentes habilidades de sus colaboradores/participantes. Se sugiere que futuros proyectos profundicen en una revisión de literatura enfocada a los impactos positivos en la sociedad generados por las universidades del territorio nacional a través de sus laboratorios de innovación. Complementada con la identificación de oportunidades en entidades gubernamentales y distritales para el desarrollo de iniciativas en centros de innovación e investigación que hagan parte de instituciones académicas.

Este proceso investigativo reforzó la idea de rediseñar la forma en cómo se ejerce la pedagogía en la academia, siendo el estudiante el principal usuario de ésta. La educación necesita ser transformada y la clave de esta transformación no es estandarizar la misma, sino personalizarla, construir logros a través del descubrimiento y reconocimiento de los talentos individuales de cada persona, para ubicar a los estudiantes en un entorno donde deseen aprender y donde puedan descubrir sus verdaderas pasiones. La academia juega un papel fundamental en la sociedad, dado que a pesar de que ésta ha sido intensamente criticada por matar la creatividad innata de los estudiantes, parece ser la única institución capaz de promover la creatividad a gran escala. Esto crea responsabilidades específicas para la decisión de educadores e investigadores.

## REFERENCIAS

- [1] Suñe, A. et al. (2012). Buenas prácticas de innovación: un estudio exploratorio de empresas tecnológicas en el sector audiovisual español. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 18(2), 139-147.
- [2] Hernández, J. & Pérez, C. (2016). Innovación para el desarrollo inclusivo: Una propuesta para su análisis. *Economía Informa* 396, 34-48.
- [3] ITM (sf). [Laboratorio de innovación social](#). Online [Nov 2017].
- [4] Anonymous (2010). Global Science & Technology Debuts West Virginia Innovation Lab. Entertainment Close.
- [5] Labitur (sf). [Laboratorio de innovación](#). Online [Nov 2017].
- [6] Van Geenhuizen, M. (2018). A framework for the evaluation of living labs as boundary spanners in innovation. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 10.
- [7] Yañez, J. et al. (2016). Open innovation laboratories for social modeling sustainable society sensitive to social needs. In *Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*.
- [8] Pecheanu, I. & Tudorie, C. (2015). Initiatives towards an education for creativity. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 180, 1520-1526.
- [9] Totorica, P. et al. (2016). The Experience of the Social Innovation Laboratory of AGESIC. In *9th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*.
- [10] Brereton, P. et al. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of systems and software* 80(4), 571-583.
- [11] Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill.
- [12] Aveyard, H. (2014). *Doing a literature review in health and social care: A practical guide*. McGraw Hill.
- [13] Baena, G. (2017). *Metodología de la Investigación*. Grupo Editorial Patria.
- [14] Greenhalgh, T. et al. (2004). Diffusion of innovations in service organizations: systematic review and recommendations. *The Milbank Quarterly* 82(4), 581-629.
- [15] Guirao, J. et al. (2008). El artículo de revisión. *Revista iberoamericana de enfermería comunitaria* 1(1), 1-25.
- [16] Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele University* 33, 1-26.
- [17] Cocu, A., Pecheanu, E. & Susnea, I. (2015). Stimulating creativity through collaboration in an innovation laboratory. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 182, 173-178.
- [18] Mavridis, A. et al. (2009). A practical model for the study of living labs complex environment. In *3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*.
- [19] Gee, S. (1981). *Technology transfer, innovation and international competitiveness*. Wiley.
- [20] Mortensen, P. & Bloch, C. (2005). *Oslo Manual-Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data: Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data*. Organisation for Economic Cooperation and Development.
- [21] Pavón, J. & Goodman, R. (1982). La planificación del desarrollo tecnológico: el caso español. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
- [22] Drucker, P. (2000). La disciplina de la innovación. *Creatividad e innovación* 8, 157-174.
- [23] Royo, F. (2012). Innovación y buenas prácticas en el gobierno y la gestión de las universidades. *RUSC* 9(2), 80-85.
- [24] Comisión Europea (1995). *El libro verde de la Innovación*. Comisión Europea.
- [25] Hernández, J. & Pérez, C. (2016). Innovación para el desarrollo inclusivo: Una propuesta para su análisis. *Economía Informa* 396, 34-48.
- [26] Pinto, M. & Pedruzzi, L. (2013). Profundizando la comprensión de los Living Labs de Brasil: Deepening in the understanding of Brazilian Living Labs. *Revista iberoamericana de ciencia tecnología y sociedad* 8(23), 231-247.
- [27] [Semiosis Lab](#).
- [28] Schaffers, H. et al. (2012). Collaboration support for cross-border networks of living labs. In *18th International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation*.
- [29] Bergvall, B., Hoist, M. & Stahlbrost, A. (2009). Concept design with a living lab approach. In *42nd Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [30] Hawk, N., Romine, M. & Bartle, G. (2012). The living labs: innovation in real-life settings. *Quarterly review of distance education*, 13(4), 225-232.
- [31] Almirall, E., Lee, M. & Wareham, J. (2012). Mapping living labs in the landscape of innovation methodologies. *Technology innovation management review*, 2(9), 12-18.
- [32] Grysckiewicz, L., Toivonen, T. & Lykourantzou, I. (2016). [Innovation Labs: 10 Defining Features](#). Online [Nov 2017].
- [33] Bergvall, B., Hoist, M. & Stahlbrost, A. (2009). Concept design with a living lab approach. *42nd Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [34] Santally, M., Cooshna, D. & Conruyt, N. (2014). A model for the transformation of the Mauritian classroom based on the Living Lab concept. In *IST-Africa Conference Proceedings*.
- [35] Mulder, I. & Stappers, P. (2009). Co-creating in practice: results and challenges. In *IEEE International on Technology Management Conference*.
- [36] Salminen, J. & Konsti, S. (2010). Facilitating user driven innovation through a Living Lab. In *IEEE International Technology Management Conference*.
- [37] Moutzi, V. & Wills, C. (2009). Utilizing living labs approach for the validation of services for the assisting living of elderly people. In *3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*.
- [38] Allen, T. (1970). Communication networks in R & D laboratories. *R&D Management* 1(1), 14-21.
- [39] Evans, J. et al. (2015). Living labs and co-production: university campuses as platforms for sustainability science. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 16, 1-6.
- [40] <https://www.innovationgrowthlab.org/>
- [41] <https://innovate.ca.gov/>

# Incidencia de la estrategia de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida

María del C. Pérez O.<sup>1</sup>

Elsa B. Gutiérrez N.<sup>2</sup>

Marianela Luzardo B.<sup>3</sup>

Universidad Pontificia Bolivariana  
Bucaramanga – Colombia

El desarrollo tecnológico y la globalización de la economía presionan al sector empresarial para mejorar continuamente sus estándares de eficiencia, calidad, innovación y capacidad de servicio al cliente. Para dar respuesta a esas presiones, muchas empresas han decidido integrarse verticalmente para lograr un mayor control de las operaciones de la cadena de valor de la industria en la que participan, realizando integraciones hacia adelante o hacia atrás a través de adquisiciones, fusiones, alianzas estratégicas o de la creación de nuevas operaciones internas. El presente trabajo evalúa en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga el impacto de implementar estrategias de integración vertical sobre el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015, evidenciada en una mayor rentabilidad Dupont frente al promedio del sector económico en Colombia. A partir de la información recopilada de 265 empresas de las 685 estudiadas, y de la aplicación de la prueba de diferencia de proporciones utilizando la distribución *t-student*, se pudo concluir al 10% de significancia que la implementación de esta estrategia no favoreció ni desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en las empresas y periodo objeto de estudio, sin embargo, fue determinante para algunos sectores económicos en particular. Estos resultados sirven de marco de referencia para la toma de decisiones estratégicas por parte del sector empresarial de la región.

## 1. INTRODUCCIÓN

El libre comercio entre las naciones, el desarrollo de bloque económicos y el rápido desarrollo tecnológico se han convertido en ejes potenciadores de la economía dentro de un mundo globalizado [1]. Estas condiciones del contexto mundial han forzado a las empresas a trabajar continuamente por la búsqueda de mejores estándares de eficiencia, calidad, innovación y su capacidad de satisfacer al cliente, con el fin de garantizar su permanencia en el mercado y elevar sus índices de competitividad.

En este contexto, muchas empresas han apostado a desarrollar procesos de integración vertical, con el fin de lograr un mayor control de las operaciones de la cadena de valor de su industria, ya sea produciendo sus propios insumos (Integración hacia atrás) o ingresando a actividades que añaden valor a sus productos y acercan a la empresa a los clientes o consumidores finales (Integración hacia adelante). Estos procesos de integración vertical se desarrollan a través de alternativas estratégicas como la adquisición o fusión con otras compañías, la realización de alianzas estratégicas con proveedores o distribuidores o la creación de nuevas unidades de negocio a través de nuevas operaciones internas. Dadas las grandes inversiones que exige la implementación de una estrategia de integración vertical, se hace pertinente estudiar la relación que existe entre esta estrategia y el logro de una ventaja competitiva sostenida por parte de las empresas.

En coherencia con lo anterior, el presente trabajo busca estudiar la incidencia de la implementación de la estrategia de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 por parte de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga, siendo medida la ventaja competitiva sostenida como la capacidad para superar la rentabilidad Dupont promedio de la industria en los tres años objeto de estudio. Para ello, se presentará un acercamiento a los conceptos de integración vertical y ventaja competitiva, y posteriormente se analizará la incidencia de esta estrategia en el logro de una ventaja competitiva a partir del estudio de antecedentes de investigaciones que estudian esta relación y del análisis del comportamiento de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga.

## 2. MARCO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL

### 2.1 Estrategia de Integración Vertical

La cadena de valor industrial se refiere al conjunto interrelacionado de actividades creadoras de un producto o servicio de valor para el comprador, en las cuales participan varias empresas de una industria. La cadena de valor industrial abarca desde la extracción de fuentes de materias primas de la naturaleza, su transformación, hasta que el producto terminado es entregado y empieza a ser usado por el consumidor final, incluyendo las actividades de post venta (devoluciones, garantías, servicio técnico, mantenimiento, instalación, reciclaje, etc.) [2]. Dado que todas las

---

<sup>1</sup> maria.perezor@upb.edu.co

<sup>2</sup> elsa.gutierrez@upb.edu.co

<sup>3</sup> marianela.luzardo@upb.edu.co

organizaciones pertenecen a un eslabón de la larga cadena de suministros de una industria, se hace importante analizar los vínculos externos o eslabones verticales, pues la forma de operación de los proveedores y canales de distribución afectan el costo, la calidad y la forma de realizar las operaciones de cualquier empresa, y su capacidad de satisfacer a los clientes. En este sentido, el análisis de la cadena de valor industrial permite descomponer el conjunto de actividades que la conforman, con la finalidad de ubicar a la empresa frente a sus clientes, proveedores y competidores y facilitar la toma de decisiones estratégicas referentes a la ampliación de operaciones, e integraciones verticales hacia adelante y hacia atrás [5], así como al desarrollo de fusiones, alianzas estratégicas o la tercerización de servicios con terceros.

La integración vertical se refiere a la estrategia de incorporar en la acción productiva de la empresa, nuevas actividades complementarias relacionadas con el bien o el servicio, tanto por encima como por debajo de la cadena de valor de la industria, con el fin de lograr eficiencias productivas asociadas a la disminución en los costos de producción y de transacción, al control de suministros y la mayor calidad del bien o servicio para el consumidor final. En ese sentido, una empresa se encuentra integrada verticalmente cuando participa en dos o más fases sucesivas de la cadena productiva. El grado de integración vertical depende, entonces, del grado de participación de la empresa en la cadena del proceso productivo [3].

Existen dos tipos de integración vertical, hacia atrás o ascendente (upstream) cuando las empresas producen los insumos requeridos para el negocio, y hacia adelante o descendente (downstream) cuando realiza actividades que lo aproximan a los consumidores o clientes finales [4]. De otra parte, existen niveles de integración vertical: integración total e integración parcial. La integración total hacia atrás en un insumo, implica que la empresa puede satisfacer internamente todas sus necesidades de insumos. La integración parcial, ya sea hacia atrás o hacia adelante, implica que la firma depende parcialmente de fuentes externas para el suministro de un insumo o la entrega de un producto [5] [6]. La integración vertical puede surgir de la formación vertical, simultáneamente a la creación de la firma; de la expansión vertical, como resultado del crecimiento de la firma que crea subsidiarias en los procesos colindantes o vecinos; y de la fusión, cuando es fruto de la adquisición de una firma existente en un proceso colindante [4].

En el pasado era común que las empresas abarcaran la totalidad de eslabones de la cadena de valor de la industria, sin embargo, la corriente estratégica actualmente dominante sostiene que las empresas deben concentrarse en sus competencias fundamentales y recurrir al mercado o subcontratar aquellas actividades que no contribuyen a reducir sus costos o el grado de incertidumbre o no contribuyen a aumentar su poder en el mercado. Esto ha llevado a que ninguna actividad sea considerada a priori como imprescindible, por lo cual todo es susceptible de ser externalizado [7].

Cada etapa de la cadena de valor industrial se puede realizar en el mercado, en la empresa o estableciendo acuerdos a mediano o largo plazo con otras empresas (contratos, alianzas, subcontratación, entre otras). A la hora de elegir entre empresa y mercado como formas alternativas de gobierno, los costos de transacción e información y los costos de gestión y control se vuelven elementos claves a considerar [7]. En las décadas de los setenta y ochenta, se desarrolló la teoría de los contratos [8] con el fin de analizar los problemas de la empresa como organización compleja, sus actividades y sus contratos. Esta literatura se ha centrado en el problema de decidir qué actividades deben realizarse internamente y cuáles no, con un énfasis especial en el análisis del paradigma de la integración vertical [9]. Los siguientes son los postulados teóricos básicos del modelo contractualista:

- La teoría de los costos de transacción y la especialidad de los activos: Esta teoría estudia las implicaciones para los costos de transacción de varios tipos de especificidad a las que se enfrentan las organizaciones, como: la localización, que implica ventajas asociadas a intercambiar con un proveedor o un comprador cercanos; la especialidad de la inversión en capital humano; la especialidad de la inversión en bienes de equipo para un producto o cliente particular [10]; y la especificidad temporal, en la cual los plazos de tiempo son limitantes en una transacción [11]. Entender las implicaciones en costos de estas especificidades, hace posible diseñar transacciones de forma que todas las partes involucradas obtengan ganancias, a través del diseño de mecanismos contractuales de salvaguardia o protección que reduzcan el riesgo de oportunismo [12].
- La teoría de la agencia y el modelo del principal y el agente: La relación de agencia se refiere a la relación que se establece siempre que hay un contrato bajo el cual una o más personas (principal) a cambio de una remuneración, contratan a otra persona (el agente), para que realice alguna actividad en beneficio de los primeros [13]. Dadas las dificultades que existen para supervisar las actividades del agente, el problema central de la teoría de la agencia busca caracterizar el contrato a través del cual el principal pueda incentivar al agente para que éste, con su actuación, defienda los intereses del principal y no los propios, y asegurar la máxima eficiencia para los participantes en la relación [9].

La decisión de integrar verticalmente las operaciones debe basarse en el estudio de los beneficios y costos de la integración, los cuales se detallan en la Tabla 1.

## **2.2 Ventaja competitiva**

Una empresa logra una ventaja competitiva cuando desarrolla una estrategia que crea valor para el cliente y el accionista y no puede ser implantada simultáneamente por cualquier competidor, real o potencial, ni se pueden

duplicar los beneficios obtenidos mediante estrategias paralelas. Para que esta ventaja competitiva sea sostenible no tiene que durar un periodo prolongado, sino que debe seguir existiendo después de que los esfuerzos por duplicarla hayan cesado. Dado que hay factores en el contexto empresarial que modifican en un momento dado esta ventaja, como por ejemplos grandes cambios tecnológicos, no debe suponerse que una ventaja competitiva debe durar para siempre [14].

**Tabla 1.** Beneficios y costos de la integración vertical [7]

Factores	Beneficios	Costos
Costos de Gestión de producción	Internalización de economías de escala (producción y logística)	Dificultad de encaje de dimensiones mínimas eficientes
	Economías de alcance	Incremento de los costes de control
	Disminución de los costes de estructura	Exceso de capacidad de producción
	Disminución de los costes de negociación	Incremento de costes de gestión y coordinación
Mercado	Disminución de la incertidumbre en el suministro: calidad y precio	Rigidez en el suministro
	Disminución de las asimetrías de información	No se aprovechan las oportunidades que ofrece el mercado
	Creación de barreras de entrada	Renunciar a los efectos de la competencia: I+D y Calidad
	Incremento del grado de diferenciación	Pérdida de especialización
Activos Específicos	Desaparición de los comportamientos oportunistas	Creación de barreras de salida
	Protección frente a copia o imitación (por control interno)	Reduce la flexibilidad y aumenta la rigidez
Tecnología	Transferencia interna de tecnología	
	Favorece el control/planificación de la producción	

La ventaja competitiva es el "valor" que los clientes que están dispuestos a pagar por los productos de una empresa. Si este "valor" es superior a los costes de producción, el producto es competitivo [15]. Dado que la ventaja competitiva implica que las empresas satisfagan las necesidades de los consumidores de manera eficaz y eficiente, al ofrecer productos o servicios que los consumidores aprecien mucho por los cuales se puede cobrar un precio más elevado, o lograr menores costos que permiten cobrar precios menores, existe una estrecha relación entre la ventaja competitiva y la rentabilidad. Esto teniendo en cuenta que, la eficacia y la eficiencia permiten elevar las utilidades al generar mayores ingresos o menores costos, respectivamente [16] y de esta manera lograr una rentabilidad mayor que el promedio de otras empresas que compiten por los mismos clientes [5].

Desde la década de los ochenta hasta la actualidad los teóricos han desarrollado dos grandes perspectivas para formular la estrategia en procesos de planeación: la perspectiva de producto-mercado, que enfatiza en los determinantes contextuales de la competitividad, y la teoría basada en recursos, la cual explica el comportamiento competitivo como el resultado de ciertas características internas intrínsecas y únicas de la organización y del desarrollo de nuevos productos y la innovación [17] [18]. Según el enfoque de la "Visión basada en los recursos" (VBR) [19] [20] [21] [22], el análisis de los recursos y capacidades de una empresa proporciona una base más estable para definir su identidad y formular estrategias, en comparación con las variables externas que están en continuo cambio. Para esto, realizar un análisis internos se convierte en un insumo importante para la formulación de las estrategias [5], ya que permite identificar y evaluar los recursos tangibles (recursos físicos y financieros), intangibles (tecnología, reputación, cultura) y humanos (habilidades, conocimientos, comunicación) de las organizaciones [23].

Desde la Teoría de recursos y capacidades han surgido dos escuelas que explican de diferente manera el origen de las rentas de las empresas y de su ventaja competitiva [24]. La Escuela estructural, la cual se centra en el análisis de los atributos que deben poseer los recursos para alcanzar una ventaja competitiva [25] [14], mientras que la Escuela de proceso, hace énfasis en el estudio de las capacidades necesarias para la adquisición, desarrollo y generación de conocimiento [26] [27] [28]. Gary Hamel y C.K. Prahalad, en su libro "Competing for the Future", proponen que la ventaja competitiva futura de una empresa dependerá de las estrategias implementadas a partir de su visión de futuro, identificando y explotando las oportunidades y gestionando la consecución de los recursos que le faltan [29]. Sin embargo, no es suficiente que una estrategia cree valor y no pueda ser duplicada para que se considere que se tiene una ventaja competitiva; es necesario que se pruebe en el mercado y que muestre superioridad ante otras estrategias creadas por la competencia [18].

Como se puede observar, las definiciones de ventaja competitiva y ventaja competitiva sostenible dejan grandes ambigüedades que permiten varias interpretaciones. El desempeño superior y la ventaja competitiva no son conceptos idénticos, pero en la bibliografía de administración estratégica se intercambia a menudo su uso y se confunde con la idea de que siempre que hay un desempeño superior habrá una ventaja competitiva y viceversa [18]. Por ello, el uso de indicadores de rentabilidad, como el retorno sobre la inversión, han sido ampliamente utilizados para evaluar la ventaja competitiva, dado que permiten comparar firmas de diferente tamaño, aun cuando operen en mercados diferentes y usen estándares contables distintos [17].

### 2.3 Estudio de antecedentes de la relación entre estrategia de integración vertical y ventaja competitiva

En coherencia con los postulados expuestos por Hamel y Prahalad, los cuales resaltan la importancia de la previsión y la estrategia para el logro de la ventaja competitiva [29] [30], este estudio intenta evaluar la relación entre el logro

de una ventaja competitiva sostenida y la implementación de estrategias de integración vertical en las empresas. En ese sentido, algunas investigaciones han centrado su foco de atención en el análisis de la incidencia de las estrategias implementadas por las empresas sobre el desempeño superior sostenido y la ventaja competitiva [31-37]. Se realizó una revisión bibliográfica de antecedentes del estudio, para lo cual se consultaron las publicaciones realizadas desde 2007 hasta el 30 de mayo de 2018 en las bases de datos EbscoHost, Science Direct y Google Académico utilizando la ecuación de búsqueda “Vertical integration and competitive advantage”.

A partir de esta revisión, se resaltan algunos estudios en los cuales se evidencia una relación positiva entre la integración vertical e indicadores asociados al logro de una ventaja competitiva. Entre estos, una investigación realizada para el caso de las empresas españolas dedicadas a la construcción de vías por concesión, evidencia que estas han logrado una ventaja competitiva en muchos países del mundo, gracias a que se han integrado verticalmente en funciones de construcción, concesión e inversión [38]. Otro estudio, evaluó el caso de las empresas de microelectrónicas japonesas, concluyendo que las empresas integradas verticalmente logran mejoras modestas en cuanto a cuota de mercado y utilidades alcanzadas con respecto a sus competidores no integrados en Japón, y mejoras considerables frente a sus competidores no integrados de otros países [39].

Adicionalmente, una investigación realizada entre las compañías de redes de internet por cable en Corea, concluyó que la integración vertical y horizontal de estas compañías genera sinergias en el portafolio, tiene un impacto positivo en los costos, gracias a las economías de escala y de alcance, y garantiza una mayor supervivencia organizacional [40]. Así mismo, un estudio realizado entre empresas de servicios de electricidad europeas confirmó la presencia economías de integración vertical entre las compañías que realizan labores de generación y transmisión de electricidad. Estas economías son equivalentes a un 14% de las utilidades y tienden a aumentar con el tamaño de las empresas [41]. De manera contradictoria, una investigación realizada para el sector de servicios de acueducto en EEUU concluyó que las economías globales y tecnológicas de la integración vertical en este sector no resultaron ser significativas, a diferencia de lo encontrado en otras industrias de servicios de electricidad y gas [42].

Frente a la relación entre la estrategia de integración vertical y el desempeño innovador de las empresas, algunos autores sugieren que el rendimiento de las innovaciones mejora hasta cierto nivel de integración vertical de las empresas, a partir del cual empieza a decrecer. Adicionalmente, resaltan que mayores niveles de integración generan barreras para el acceso al conocimiento externo [43]. En este sentido, llama la atención la realización de estudios en los que se argumenta que la integración vertical va en detrimento de la calidad y la innovación, afectando directamente al cliente final y generando un costos social, y en los que se afirma que esta estrategia implica asimetrías con los competidores no integrados; razón por la cual se propone el control Estatal sobre los niveles de integración en algunas industrias [44] [45] [46] [44] [6]. Adicionalmente, algunos estudios expresan una preocupación por la integración vertical hacia atrás de empresas que operan como monopolios en el mercado, dado que esta estrategia les permite generar y apropiarse de un mayor nivel de ganancias de la industria, a expensas de los consumidores [47].

De otra parte, algunos autores han estudiado el impacto de la desintegración en algunas industrias. Este es el caso de un estudio realizado a partir de las transacciones de marcas registradas en los EE. UU. (Nike, Reebok, etc.), el cual encontró una relación positiva entre el grado de desintegración vertical de la industria y el tamaño de mercado de marcas [48].

### 3. MÉTODO

La investigación documental que se presenta tiene un alcance de tipo comparativo, y buscó responder a la pregunta de investigación: ¿Existen diferencias en el logro de la ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 entre las empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia) que implementaron la estrategia de integración vertical, frente a aquellas que no la implementaron? En este sentido, se establece la hipótesis de la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre estos dos grupos de empresas, tanto de manera consolidada, como por sector económico. Se tomó como referencia la Ley 905 de agosto 2 de 2004 de la República de Colombia con el fin de clasificar las medianas y grandes empresas, teniendo en cuenta el valor de los activos al año 2016 de las empresas objeto de estudio, según se detalla en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Clasificación de empresas según su tamaño [49]

Tipo de Empresa	Empleados	Valor de Activos en SMMLV
Microempresas	No superior a los 10 trabajadores	Inferior a 500 SMMLV
Pequeña	Entre 11 y 50 trabajadores	Entre 501 y 5.000 SMMLV
Mediana	Entre 51 y 200 trabajadores	Entre 5.001 y 30.000 SMMLV
Gran Empresa	Superior a 200 trabajadores	Más de 30.001 SMMLV

Los criterios de inclusión utilizados para determinar la población objetivo del estudio fueron: ser medianas y grandes empresas con sede principal en los cuatro municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) y haber renovado la matrícula mercantil y reportado información financiera a la Cámara de Comercio de Bucaramanga en los años 2013, 2014 y 2105. A partir de estos criterios de inclusión se determinó una población de 685 empresas distribuidos en 13 sectores, como se observa en la Tabla 3. Se determinó trabajar para el estudio con una muestra de 194 empresas distribuidas en los 13 sectores económicos evaluados,



utilizando un muestreo estratificado con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 90%. Finalmente, se logró recolectar información de 265 empresas, logrando superar la muestra propuesta para todos los sectores económicos.

La distribución de la población, la muestra propuesta y la muestra real por sector económico se puede observar en la Tabla 3. Se estableció el índice de rentabilidad Dupont como el criterio bajo el cual se clasificarían las empresas que lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013-2015, dada la limitada información financiera que reportan las empresas a la Cámara de Comercio de Bucaramanga. El índice Dupont permite analizar qué tanto de cada venta es ganancia para las empresas, que tan eficientes han sido en administrar sus activos y el uso de apalancamiento financiero, reuniendo en un solo indicador el estado de situación financiera y el estado de resultados [50]. El índice de rentabilidad Dupont se puede calcular a partir de las ecuaciones (1), (2) o (3).

**Tabla 3.** Población objetivo y muestra

Sector	Población	Población por Sector	Muestra propuesta	Muestra Real	Muestra Real por sector
Actividades inmobiliarias	45	6,6%	13	13	28,9%
Alojamiento y servicios de comida	9	1,3%	3	6	66,7%
Bancos	23	3,4%	7	7	30,4%
Comercio al por mayor	214	31,2%	61	61	28,5%
Construcción	157	22,9%	44	44	28,0%
Consultoría y arquitectura	31	4,5%	9	18	58,1%
Distribución de agua y evaluación	8	1,2%	2	7	87,5%
Ganadería, caza y silvicultura	61	8,9%	17	17	27,9%
Información y comunicación	9	1,3%	3	5	55,6%
Otras dependencias	42	6,1%	12	30	71,4%
Salud	35	5,1%	10	27	77,1%
Suministros de electricidad, gas	11	1,6%	3	10	90,9%
Transporte y almacenamiento	40	5,8%	11	20	50,0%
Consolidado	685	100,0%	194	265	38,7%

$$\text{Dupont} = \text{Margen sobre Ventas} \times \text{Rotación de Activos} \quad (1)$$

$$\text{Dupont} = \frac{\text{Utilidad Neta}}{\text{Ventas}} \times \frac{\text{Ventas}}{\text{Activos}} \quad (2)$$

$$\text{Dupont} = \frac{\text{Utilidad Neta}}{\text{Activos}} \quad (3)$$

La investigación del índice Dupont promedio por sector económico de todas las empresas a nivel nacional publicado en la base de datos Benchmark para Colombia, permitió identificar las medianas y grandes empresas del A.M.B. que lograron un índice de rentabilidad Dupont superior al promedio de las empresas de su respectivo sector a nivel nacional en los tres años de estudio (2013, 2014 y 2015), lo que permitió clasificar las empresas objeto de estudio en dos grupos: empresas que lograron una ventaja competitiva sostenida (VC) y empresas sin ventaja competitiva sostenida (NVC). Para la investigación documental presentada se utilizó como fuentes de información los reportes financieros de la Cámara de Comercio de Bucaramanga y de Benchmark para identificar el perfil financiero de las empresas (VC y SVC) y la información publicada por las empresas en internet (portal web e informes públicos) para analizar los negocios de la cadena de valor de la industria en los que participan.

#### 4. RESULTADOS

El Área Metropolitana de Bucaramanga (Departamento de Santander, Colombia) cuenta con 685 medianas y grandes con sede principal en los cuatro municipios del área (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) que permanecieron activas y reportaron información financiera a la Cámara de Comercio de Bucaramanga en los años 2013, 2014 y 2015, de las cuales sobresalen los sectores de Comercio al por Mayor y Construcción, que representan el 31.2% y el 22.9% de las empresas y se resalta la ausencia de empresas manufactureras que cumplan estos requisitos (Ver tabla 3). Se realizó una evaluación financiera de la muestra de 265 empresas estudiada con el fin de identificar cuales lograron superar el índice de rentabilidad promedio Dupont del sector económico a nivel nacional en los tres años de estudio, lo cual permitió clasificarlas en dos grupos: 105 empresas con ventaja competitiva sostenida (VC) en el periodo y 160 sin ventaja competitiva sostenida (NVC). Se resalta el desempeño de los sectores de Alojamiento y Servicios de Comida, Consultoría y Arquitectura, Información y Comunicación, Bancos y Salud, ordenados de mayor a menor, en los cuales un porcentaje mayor o igual al 50% de las empresas logró una ventaja competitiva sostenida en el periodo (Ver tabla 4).

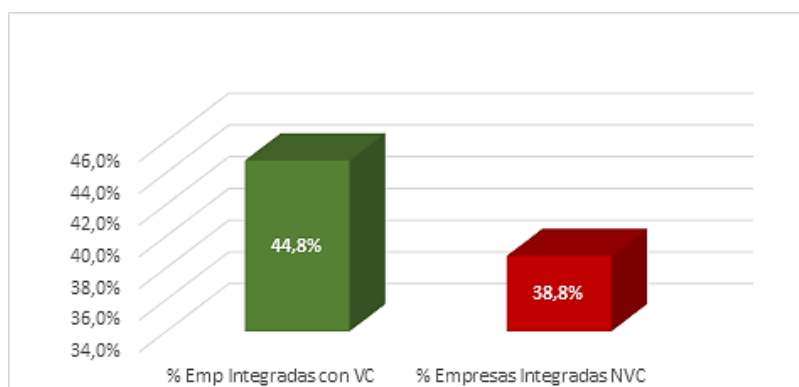
La integración vertical permite el control de las operaciones de la cadena de valor industrial por parte de las empresas, lo cual se espera redunde en mayor eficiencia, calidad, innovación y capacidad de servicio, y, por lo tanto, en una ventaja competitiva sostenida. Dado lo anterior, se consideró pertinente estudiar el impacto de implementar estrategias de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga. Para identificar el perfil financiero de las empresas (VC y NVC) se utilizaron como fuentes de información los reportes financieros de la Cámara de Comercio de Bucaramanga y de

Benchmark y para evaluar la integración vertical de las empresas, se utilizó la información publicada por las empresas en internet (portal web e informes públicos). A partir de las fuentes de información consultadas, se realizó un análisis de cuales de las 105 empresas VC y de las 160 NVC están integradas verticalmente. Con el fin de probar la existencia de diferencias estadísticamente significativa entre la proporción de empresas VC y NVC que implementaron la estrategia estudiada, tanto de manera consolidada como por sector, se utilizó la distribución t-student con niveles de confianza del 90%, 95% y 99%, para lo cual se realizó el procesamiento de datos estadísticos con el software Minitab-v17® [51] [52].

**Tabla 4.** Análisis de empresas que lograron o no una ventaja competitiva sostenida por sector

Sector	Muestra	Empresas VC		Empresas NVC	
		No.	%	No.	%
Actividades inmobiliarias	13	3	23,1	10	76,9
Alojamiento y servicios de comida	6	4	66,7	2	33,3
Bancos	7	4	57,1	3	42,9
Comercio al por mayor	61	28	45,9	33	54,1
Construcción	44	10	22,7	34	77,3
Consultoría y arquitectura	18	11	61,1	7	38,9
Distribución de agua y evaluación	7	3	42,9	4	57,1
Ganadería, caza y silvicultura	17	5	29,4	12	70,6
Información y comunicación	5	3	60,0	2	40,0
Otras dependencias	30	12	40,0	18	60,0
Salud	27	15	55,6	12	44,4
Suministros de electricidad, gas	10	4	40,0	6	60,0
Transporte y almacenamiento	20	3	15,0	17	85,0
Consolidado	265	105	39,6	160	60,4

En primera instancia, se hizo la comparación consolidada del comportamiento del 100% de las empresas VC frente al 100% de las NVC, independientemente del sector al que pertenecen, para determinar si la proporción de empresas integradas verticalmente lograron tener una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 (VC) es estadísticamente diferente a la proporción de empresas integradas verticalmente que no lograron una ventaja competitiva sostenida (NVC). En el consolidado de empresas estudiadas existe una diferencia positiva del 6,07% entre las compañías con VC y NVC integradas verticalmente, como se puede observar en la Figura 1 y en la Tabla 5, no siendo esta diferencia estadísticamente significativa según la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student. A partir de estos resultados se comprueba que implementar la estrategia de integración vertical no favoreció ni desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2.013 a 2.015 en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga.



**Figura 1.** Porcentaje de empresas integradas verticalmente con y sin Ventaja Competitiva

Para el análisis de las empresas integradas verticalmente por sector económico, se presenta por cada grupo de empresas estudiadas (Empresas que lograron (VC) y no lograron una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 (NVC)), el número total de empresas, el número de empresas integradas verticalmente y la proporción de empresas integradas frente al total de empresas del grupo. Así mismo, se presenta la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC integradas verticalmente (%VC-NVC), y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student. Se sombrea en gris las diferencias estadísticamente significativas al 1%, 5% y 10%, sobre las que se concluye. Se aclara que no se incluye el valor de la prueba P cuando la diferencia entre proporciones es cero o la muestra es muy pequeña.

Al realizar el análisis por sector económico (Ver tabla 5), se concluye que existe una diferencia negativa de 75% entre estos dos grupos de empresas en el sector de Alojamiento y Servicios de Comida, con lo cual se comprueba que la estrategia de integración vertical desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 en las empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga de este sector (p-valor=0.01). Esto significa que los hoteles y restaurantes que decidieron dar un paso adelante en la cadena de valor industrial ofreciendo servicios de logística de eventos para aproximarse a los clientes finales, y de esta manera aprovechar su capacidad

instalada en habitaciones y preparación de comidas, lograron un desempeño inferior al promedio nacional en el periodo de tiempo estudiado. Para el resto de sectores, la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student no es estadísticamente significativa, por lo cual se concluye que la integración vertical no favoreció ni desfavoreció el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en el resto de empresas.

**Tabla 5.** Porcentaje de empresas integradas verticalmente con y sin ventaja competitiva sostenida

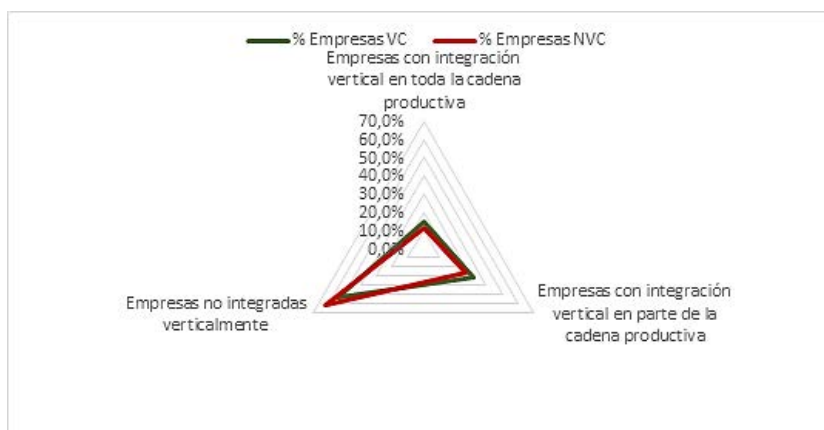
Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)		Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)		% Empresas integradas verticalmente VC-NVC	P		
	Total Empresas VC	Empresas integradas verticalmente VC		Total empresas NVC			Empresas integradas verticalmente NVC	
		No.	%				No.	%
Actividades inmobiliarias	3	1	33,3%	10	1	10,0%	23,3%	0,418
Alojamiento y servicios de comida	4	1	25,0%	2	2	100,0%	-75,0%	0,001
Bancos	4	1	25,0%	3	0	0,0%	25,0%	0,248
Comercio al por mayor	28	10	35,7%	33	12	36,4%	-0,6%	0,958
Construcción	10	6	60,0%	34	12	35,3%	24,7%	0,159
Consultoría y arquitectura	11	4	36,4%	7	3	42,9%	-6,5%	0,784
Distribución de agua y evaluación	3	3	100,0%	4	3	75,0%	25,0%	0,248
Ganadería, caza y silvicultura	5	2	40,0%	12	6	50,0%	-10,0%	0,703
Información y comunicación	3	1	33,3%	2	1	50,0%	-16,7%	0,709
Otras dependencias	12	5	41,7%	18	6	33,3%	8,3%	0,644
Salud	15	10	66,7%	12	8	66,7%	0,0%	1,000
Suministros de electricidad, gas	4	2	50,0%	6	3	50,0%	0,0%	1,000
Transporte y almacenamiento	3	1	33,3%	17	5	29,4%	3,9%	0,894
Consolidado	105	47	44,8%	160	62	38,8%	6,0%	0,332

#### 4.1 Influencia del grado de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida

Se realizó la evaluación del grado de integración vertical de cada una de las empresas objeto de estudio, lo que permitió su clasificación en tres grupos:

- Empresas integradas verticalmente que abarcan todos los eslabones de la cadena de valor de la industria en la que participan.
- Empresas integradas verticalmente que abarcan parcialmente la cadena de valor de la industrial al participan en dos o más eslabones de la cadena de valor de la industrial, sin abarcarlos totalmente.
- Empresas no integradas verticalmente. Corresponden a las empresas que se concentran en la producción de un bien o la prestación de un servicio como tal, participando en una sola etapa o eslabón de la cadena de valor de la industria. Estas empresas se caracterizan por buscar en el mercado bienes y/o servicios o suministros pertenecientes a las otras etapas de la cadena productiva.

A partir de esta clasificación, se procedió a evaluar el impacto del grado de integración vertical en el logro de una ventaja competitiva sostenida. Para ello, se compararon las empresas con ventaja competitiva sostenida (VC) y las que no lo lograron (NVC) según el grado de integración vertical (Ver Figura 2), evidenciando una diferencia positiva del 3,0% y el 4,6% entre las compañías con integración vertical que abarcan totalmente o parcialmente los eslabones de la cadena de valor de la industria, respectivamente, y una diferencia negativa del 7,6% entre aquellas que no están integradas verticalmente. Sin embargo, ninguna de estas diferencias resultó ser estadísticamente significativa según la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student ( $p$ -valor $>0,1$ ), por lo cual se concluye que ninguno de los grados de integración favoreció, ni desfavoreció, el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en las empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga.



**Figura 2.** Porcentaje de empresas según si nivel de integración vertical con y sin Ventaja Competitiva

Para analizar el comportamiento de cada grado de integración en los diferentes sectores económicos estudiados, en las tablas 6, 7 y 8 se presentan para cada grupo de empresas estudiada (Empresas que lograron -VC- y no lograron una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 -NVC-): el número total de empresas, el número de empresas con el grado de integración estudiado y la proporción de empresas que tienen ese grado de integración frente al total de empresas del grupo. Así mismo, se presenta la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC con cada grado de integración vertical (%VC-NVC), y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student. Se sombrea en gris las diferencias estadísticamente significativas al 1%, 5% y 10%, sobre las que se concluye.

Al analizar el comportamiento de las empresas integradas verticalmente que abarcan la totalidad de la cadena de valor de la industria por sector económico (Ver tabla 6), se concluye que, a pesar de que este grado de integración no resultó ser determinante para el desempeño superior sostenido del consolidado de medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga, favoreció el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en las empresas del sector Construcción, y Distribución de Agua y Evacuación (p-valor<0,05).

Para el caso de las empresas de construcción, se evidencia una diferencia de 37,1% entre las empresas que lograron y no lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo de estudio. Esto significa que ofrecer servicios asociados con toda la cadena de valor de la industria, como son los servicios de ingeniería, diseño, construcción, interventoría, instalación de redes eléctricas y de telecomunicaciones y mantenimiento, fue un factor determinante para que las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga (A.M.B.) de este sector logaran de un desempeño superior en el periodo 2013 a 2015.

Para el caso particular de las empresas de Distribución de Agua y Evacuación, se observa una diferencia del 50% entre las empresas VC y NVC. Esto implica que el desempeño superior sostenido en el periodo 2013 a 2015 de las medianas y grandes empresas del A.M.B. de este sector estuvo asociado con el hecho de ofrecer servicios que cubren toda la cadena de valor en la gestión de residuos sólidos y/o del agua. La cadena de valor de la gestión de residuos sólidos abarca actividades de limpieza, recolección, transporte, almacenamiento temporal, disposición final y tratamiento de residuos sólidos, así como la asesoría y consultoría en manejo de este tipo de residuos. Por su parte, la cadena productiva para la gestión del agua incorpora labores de elaboración de estudios ambientales y caracterización de aguas; elaboración y comercialización de productos de control ambiental; diseño, construcción y puesta en marcha de sistemas de tratamiento de aguas; comercialización de agua doméstica o comercial y agua embotellada y mantenimiento de sistemas de tratamiento de agua.

Así mismo, el análisis por sector económico de las empresas integradas verticalmente que abarcan la totalidad de los eslabones de la cadena de valor de la industria, permitió concluir que este grado de integración desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 en las empresas medianas y grandes del A.M.B. del sector de Suministro de Electricidad y Gas (p-value<0,10), en las cuales hubo una diferencia del 33.3% entre las empresas con y sin ventaja competitiva sostenida, como se observa en la tabla 6. Esto implica que las empresas de este sector que abarcaron servicios de toda la cadena de valor de la industria tuvieron un desempeño inferior al promedio nacional. Este es el caso de las empresas electrificadoras que ofrecen servicios que abarcan la generación, distribución, transmisión, comercialización de energía y actividades conexas, y el caso de las empresas especializadas en motores, que ofrecen servicios de suministro, asesoría técnica, instalación y mantenimiento preventivo y correctivo.

**Tabla 6.** Comparativo del desempeño por sectores de empresas integradas verticalmente que abarcan toda la cadena productiva

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas integradas en toda la cadena productiva VC		Total empresas NVC	Empresas integradas en toda la cadena productiva NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	0	0,0%	10	0	0,0%	0,0%	*
Alojamiento y servicios de comida	4	1	25,0%	2	0	0,0%	25,0%	0,248
Bancos	4	0	0,0%	3	0	0,0%	0,0%	*
Comercio al por mayor	28	1	3,6%	33	3	9,1%	-5,5%	0,366
Construcción	10	4	40,0%	34	1	2,9%	37,1%	0,019
Consultoría y arquitectura	11	0	0,0%	7	0	0,0%	0,0%	*
Distribución de agua y evaluación	3	3	100,0%	4	2	50,0%	50,0%	0,046
Ganadería, caza y silvicultura	5	1	20,0%	12	5	41,7%	-21,7%	0,343
Información y comunicación	3	0	0,0%	2	0	0,0%	0,0%	*
Otras dependencias	12	1	8,3%	18	1	5,6%	2,8%	0,773
Salud	15	3	20,0%	12	4	33,3%	-13,3%	0,435
Suministros de electricidad, gas	4	0	0,0%	6	2	33,3%	-33,3%	0,083
Transporte y almacenamiento	3	1	33,3%	17	0	0,0%	33,3%	0,221
Consolidado	105	15	14,3%	160	18	11,3%	3,0%	0,473

De otra parte, se realizó el análisis por sector económico de las empresas integradas verticalmente que abarcan parcialmente los eslabones de la cadena de valor de la industria. Este análisis permitió concluir que, a pesar de que este grado de integración no resultó ser determinante para el desempeño superior sostenido del consolidado de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga, participar en una parte de la cadena de valor de la industria desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el sector de Transporte y Almacenamiento (p-valor<0,01), en el cual se observa una diferencia negativa de 29,4% entre las empresas que lograron y no lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo de estudio (Ver tabla 7). Este sector está compuesto principalmente por empresas de logística de gas y petróleo, además de empresas que ofrecen servicios de logística en general a nivel nacional e internacional.

**Tabla 7.** Desempeño por sectores de empresas integradas verticalmente que abarcan parcialmente la cadena productiva

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas integradas en parte de la cadena productiva VC		Total empresas NVC	Empresas integradas en parte de la cadena productiva NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	1	33,3%	10	1	10,0%	23,3%	0,418
Alojamiento y servicios de comida	4	0	0,0%	2	2	100,0%	-100,0%	*
Bancos	4	1	25,0%	3	0	0,0%	25,0%	0,248
Comercio al por mayor	28	9	32,1%	33	9	27,3%	4,9%	0,678
Construcción	10	2	20,0%	34	11	32,4%	-12,4%	0,410
Consultoría y arquitectura	11	4	36,4%	7	2	28,6%	7,8%	0,728
Distribución de agua y evaluación	3	0	0,0%	4	1	25,0%	-25,0%	0,248
Ganadería, caza y silvicultura	5	1	20,0%	12	1	8,3%	11,7%	0,551
Información y comunicación	3	1	33,3%	2	1	50,0%	-16,7%	0,709
Otras dependencias	12	5	41,7%	18	5	27,8%	13,9%	0,433
Salud	15	7	46,7%	12	4	33,3%	13,3%	0,477
Suministros de electricidad, gas	4	2	50,0%	6	1	16,7%	33,3%	0,255
Transporte y almacenamiento	3	0	0,0%	17	5	29,4%	-29,4%	0,008
Consolidado	105	33	31,4%	160	43	26,9%	4,6%	0,427

Para el caso de empresas de transporte, les perjudicó abarcar parcialmente las actividades de la cadena de valor de la industria, como son el comercio de combustible a través de estaciones de servicio, la venta de autopartes, el transporte terrestre automotor de pasajeros, así como el transporte por carretera de carga seca, líquida y refrigerada. Por su parte, las empresas que trabajan con logística de gas y petróleo vieron desfavorecido su desempeño al abarcar solamente algunas de las actividades de la cadena de valor como son la prestación de servicios técnicos de asesoría y de interventoría de obras en los diferentes campos de la ingeniería de petróleo y gas, y la construcción y operación de gasoductos, oleoductos y estaciones de servicio en las que se expende gas natural, gasolina y/o kerosenes.

**Tabla 8.** Comparativo del desempeño por sectores de empresas no integradas verticalmente

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas No integradas verticalmente VC		Total empresas NVC	Empresas No integradas verticalmente NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	2	66,7%	10	9	90,0%	-23,3%	0,418
Alojamiento y servicios de comida	4	3	75,0%	2	0	0,0%	75,0%	0,001
Bancos	4	3	75,0%	3	3	100,0%	-25,0%	0,248
Comercio al por mayor	28	18	64,3%	33	21	63,6%	0,6%	0,958
Construcción	10	4	40,0%	34	22	64,7%	-24,7%	0,159
Consultoría y arquitectura	11	7	63,6%	7	5	71,4%	-7,8%	0,728
Distribución de agua y evaluación	3	0	0,0%	4	1	25,0%	-25,0%	0,248
Ganadería, caza y silvicultura	5	3	60,0%	12	6	50,0%	10,0%	0,703
Información y comunicación	3	2	66,7%	2	1	50,0%	16,7%	0,709
Otras dependencias	12	6	50,0%	18	12	66,7%	-16,7%	0,636
Salud	15	5	33,3%	12	4	33,3%	0,0%	*
Suministros de electricidad, gas	4	2	50,0%	6	3	50,0%	0,0%	*
Transporte y almacenamiento	3	2	66,7%	17	12	70,6%	-3,9%	0,894
Consolidado	105	57	54,3%	160	99	61,9%	-7,6%	0,221

De otra parte, las empresas de logística nacional se vieron desfavorecidas al participar parcialmente en los eslabones de la cadena de valor, al cubrir parcialmente actividades como embalaje, bodegaje, traslados empresariales, archivo y mudanzas locales y nacionales. Así mismo, el desempeño de las empresas de logística internacional fue impactado

negativamente al cubrir solamente algunas de las siguientes actividades de su industria como el agenciamiento aduanero de importaciones y exportaciones, la logística de operaciones portuarias, el desembalaje de contenedores, el almacenamiento de mercancías y la distribución nacional a través de transporte terrestre, fluvial y férreo. Por último, se analizaron las empresas que no están integradas verticalmente por sector económico, es decir, aquellas empresas que se dedican a la producción de un bien o la prestación de un servicio, especializadas en una sola operación de la cadena de valor industrial. Estas empresas se caracterizan por acudir al mercado para la búsqueda de suministros y de bienes y servicios pertenecientes a las otras etapas de la cadena productiva (Ver tabla 8). Este análisis permitió concluir que, a pesar de que este grado de integración no resultó determinante para el desempeño superior sostenido del consolidado de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana, el no estar integrado verticalmente favoreció el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en las empresas del sector de Alojamiento y Servicios de Comida ( $p$ -valor=0,00), en el cual se evidencia una diferencia de 75% entre las empresas VC y NVC. Es decir, que los restaurantes y hoteles que no han extendidos sus operaciones a la prestación de servicios de logística de eventos, presentaron un desempeño superior frente al promedio nacional.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La evaluación de las diferencias entre la proporción de empresas que lograron y no lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 (VC y NVC) de los 13 sectores económicos evaluados, permite rechazar la hipótesis al 10% de significancia, según la prueba t-student, de que existen diferencias en el logro de la ventaja competitiva en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga que están integradas verticalmente. Así mismo, el análisis por sector económico permitió comprobar que la estrategia de integración vertical desfavoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para el caso en particular de las empresas del sector de Alojamiento y Servicios de Comida. Estas conclusiones contrastan con los resultados de estudios anteriores que encontraron una relación positiva entre la estrategia de integración vertical y el logro de menores costos, mayores utilidades y una ventaja competitiva [38] [39] [40] [41]. Adicionalmente:

- La no implementación de la estrategia de integración vertical, especializándose en uno de los eslabones de la cadena de valor de la industria, no resultó ser determinante para el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para el consolidado de medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga. Sin embargo, el análisis por sector económico permitió concluir que el no estar integradas verticalmente favoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en las empresas del sector Alojamiento y Servicios de Comida, lo cual es coherente con la conclusión general del estudio anteriormente mencionada.
- La implementación de una estrategia de integración vertical abarcando toda la cadena de valor de la industria no favoreció ni desfavoreció el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en el consolidado de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga de todos los sectores económicos estudiado. Sin embargo, el cubrir todos los eslabones de la cadena productiva favoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en las empresas objeto de estudio del sector de Construcción, y Distribución de Agua y Evacuación, y desfavoreció a las empresas del sector de Suministro de Electricidad y Gas. Esta conclusión reafirma los resultados de la investigación realizada en empresas españolas del sector de obras civiles [38], sin embargo va en contradicción con los resultados del estudio realizado en empresas que prestan servicios de agua en E.E.U.U. [42] y de electricidad en Europa [41].
- El abarcar parcialmente la cadena de valor de la industria no afectó positiva ni negativamente el logro de una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 en el consolidado de medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga, sin embargo, este grado de integración vertical desfavoreció el logro de un desempeño superior sostenido en las empresas de Transporte y Almacenamiento.

En contraste con los postulados de Hamel y Prahalad (1994) sobre la importancia de la previsión y la estrategia para el logro de la ventaja competitiva [29], este estudio no permite concluir sobre la influencia de la implementación de la estrategia de integración vertical hacia adelante o hacia atrás en el logro de una ventaja competitiva sostenida en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga durante el periodo 2013 a 2015, con excepción de algunos sectores económicos en particular. La escasa publicación de estudios sobre el impacto a mediano plazo de la estrategia de integración vertical en la rentabilidad empresarial y el logro de una ventaja competitiva, fueron limitantes para el desarrollo del presente estudio, pero a su vez refleja el aporte novedoso de esta investigación. La ampliación de esta investigación a otros municipios del Departamento de Santander u otros departamentos de Colombia se constituye en oportunidades para futuras líneas de investigación, así como la complementación del estudio con la evaluación del impacto de otras estrategias empresariales en el logro de una ventaja competitiva sostenida y la ampliación a otros periodos de tiempo.

### Agradecimientos

El estudio presentado hace parte de los resultados derivados del proyecto de investigación “Caracterización del proceso de administración estratégica en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga que lograron desarrollar una Ventaja Competitiva en el periodo comprendido entre el año 2013 y el 2015”, (Código 026-0716-2200), patrocinado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

## REFERENCIAS

- [1] Muñoz, J. (2003). Sobre las tendencias de la Administración. Algunas reflexiones preliminares. *Revista Académica e Institucional de la U.C.P.P.R.*, 112-133.
- [2] Morillo, M. (2005). Análisis de la Cadena de Valor Industrial y de la Cadena de Valor Agregado para las Pequeñas y Medianas Industrias. *Actualidad Contable FACES* 8(10), 53-70.
- [3] Tamayo, M. & Piñeros, J. (2007). Formas de integración de las empresas. *Ecos de Economía: A Latin American Journal of Applied Economics* 11(24), 27-45.
- [4] Perry, M. (1989). Vertical Integration. Determinants and Effects. *Handbook of Industrial Organization* 1, 183-255.
- [5] Hill, C. & Jones, G. (2011). *Administración Estratégica - Un enfoque integral*. Cengage Learning.
- [6] Restrepo, J., Lopera, J. & Rodríguez, S. (2007). La integración vertical en el sistema de salud colombiano. *Revista de Economía Institucional* 9(17), 279-308.
- [7] Gil, S. & Camacho, J. (2002). La Integración Vertical: Costes, Beneficios y Toma de Decisiones. *Dirección y Organización* 27, 5-13.
- [8] Caldentey, P. (1998). *Nueva Economía Agroalimentaria*. Editorial Agrícola Española.
- [9] Andrés, S. & Compés, R. (2009). Problemas contractuales y acuerdos de subcontratación: el caso de la logística frigorífica en la industria alimentaria valenciana. *Estudios de economía aplicada* 27(1), 1-29.
- [10] Williamson, O. (1996). Efficiency, Power, Authority and Economic Organization. In *Transaction Cost Economics and Beyond*.
- [11] Masten, S., Meehan, J. & Snyder, E. (1991). The Costs of Organization. *Journal of Law, Economics and Organization* 7(1), 1-25.
- [12] Klein, B. (1992). *Contracts and Incentives: The Role of Contract Terms in Assuring Performance*. Wiley.
- [13] Salas, V. (1996). *Economía de la Empresa: Decisiones y Organización*. Ariel Editorial.
- [14] Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management* 17(1), 99-120.
- [15] Porter, M. (2015). *Ventaja Competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior*. Equipo Editorial Patria.
- [16] Thompson, A. (2012). *Administración Estratégica Teoría y Casos*. McGraw Hill.
- [17] Ynzunza, C. & Izar, J. (2013). Efecto de las estrategias competitivas y los recursos y capacidades orientados al mercado sobre el crecimiento de las organizaciones. *Contaduría y administración* 58(1), 169-197.
- [18] Álvarez, M. (2003). Competencias Centrales y Ventaja Competitiva: El concepto, su evolución y su aplicabilidad. *Contaduría y Administración* 209, 5-22.
- [19] Teece, D. (1986). Profiting from Technological Innovation: Implications for Integration, Collaboration, Licensing and Public Policy. *Research Policy* 15(6), 285-305.
- [20] Amit, R. & Schoemaker, P. (1993). Strategic Assets and Organizational Rent. *Strategic Management Journal* 14(1), 33-46.
- [21] Peteraf, M. (1993). The Cornerstones of Competitive Advantage: A Resource Based-View. *Strategic Management Journal* 14(3), 179-191.
- [22] Martínez, R., Abando, J. & Araujo, A. (2010). Un modelo causal de competitividad empresarial planeado desde la VBR: capacidades directivas, de innovación y calidad. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 16(2), 165-188.
- [23] Planellas, M. & Muni, A. (2015). *Las Decisiones Estratégicas*. Penguin.
- [24] Calix, C., Vigier, H., & Briozzo, A. (2015). Capital intelectual y otros determinantes de la ventaja competitiva en empresas exportadoras de la zona norte de Honduras. *Suma de Negocios* 6(14), 130-137.
- [25] Schulze, W. (1994). The two schools of thought in resource-based theory: Definitions and implications for research. *Advances in Strategic Management* 10, 127-151.
- [26] Wernerfelt, B. (1984). A resource-based view of the firm. *Strategic Management Journal* 5, 171-180.
- [27] Nonaka, I. (1991). The knowledge-creating company. *Harvard Business Review* 69, 96-104.
- [28] Teece, D. (1998). Research directions for Knowledge management. *California Management Review* 40, 289-292.
- [29] Hamel, G. & Prahalad, C. (1996). *Compitiendo por el futuro*. Harvard Business School Press.
- [30] Hamel, G. & Heene, A. (1994). *The Concept of Core Competence. Competence Based Competition*. Wiley.
- [31] Vila, N. & Küster, I. (2015). Does Internationalization Drive a Family Business into Success? Case in the Textile Sector. *Innovar* 25(56), 43-52.
- [32] Chen, P. (2016). Exploration of an effective development process in integrative strategy. *Production Planning & Control* 27(15), 1260-1279.
- [33] Salavou, H. (2013). Hybrid strategies in Greece: a pleasant surprise. *European Business Review* 25(3), 301-314.
- [34] Hinterhuber, A. & Liozu, S. (2014). Is innovation in pricing your next source of competitive advantage? *Business Horizons* 57(3), 413-423.
- [35] Punnakitikashem, P. (2012). Hospital quality initiative and operating efficiency: Evidence from emerging economy country. In *IEEE International Conference in Management of Innovation and Technology*.
- [36] Tian Y. et al. (2012). How could service-orientation contribute to business performance: The mediation effect of service practice. In *International Conference in Management Science and Engineering*.
- [37] Devakumar, G. & Barani, G. (2016). Marketing strategies for competitive advantage: structural equation modelling approach on agricultural sector industry in South India. *International Journal of Business Excellence* 9(2), 225-239.
- [38] Carpintero, S. (2011). The competitive advantages of the spanish companies in the international toll and road industry. *Journal of Civil Engineering and Management* 17(4), 483-493.
- [39] Krause, C. (1995). Japanese microelectronics: Creating competitive advantage by vertical interaction. *Journal of Economic Behavior and Organization* 28, 49-61.
- [40] Kim, H., Park M. & Lee, S. (2017). Do vertically and horizontally integrated firms survive longer? The case of cable networks in Korea. *Information Economics and Policy* 39, 84-93.
- [41] Gugler, K., Liebensteiner, M. & Schmitt, S. (2017). Vertical disintegration in the European electricity sector: Empirical evidence on lost synergies. *International Journal of Industrial Organization* 52, 450-478.

- [42] García, S., Moreaux, M. & Reynaud, A. (2007). Measuring economies of vertical integration in network industries: An application to the water sector. *International Journal of Industrial Organization* 25, 791-820.
- [43] Li, H. & Tang, M. (2010). Vertical integration and innovative performance: The effects of external knowledge sourcing modes. *Technovation* 30, 401-410.
- [44] Zanchettin, P. & Mukherjee, A. (2017). Vertical integration and product differentiation. *International Journal of Industrial Organization* 55, 25-57.
- [45] D'Annunzio, A. (2017). Vertical integration in the TV market: Exclusive provision and program quality. *International Journal of Industrial Organization* 53, 114-144.
- [46] Biancini, S. & Ettinger, D. (2017). Vertical integration and downstream collusion. *International Journal of Industrial Organization* 53, 99-113.
- [47] de Fontenay, C. & Gans, J. (2004). Can vertical integration by a monopsonist harm consumer welfare? *International Journal of Industrial Organization* 22, 821- 834.
- [48] Lechner, C., Lorenzoni G. & Tundis, E. (2016). Vertical disintegration of production and the rise of market for brands. *Journal of Business Venturing Insights* 6, 1-6.
- [49] Ley 905 de agosto 2. (2004). Por medio de la cual se modifica la Ley 590 de 2000 sobre promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana y se dictan otras disposiciones.
- [50] Menjivar, C., Miranda, E. & Molina, C. (2014). Medición de la rentabilidad basado en el sistema Dupont, para las pequeñas y medianas empresas comercializadoras de productos de ferretería del municipio de San Salvador. Universidad del Salvador.
- [51] Ilzarbe, L. et al. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta. *Tecnura* 10(20), 127-138.
- [52] Gómez, R. & Correa, A. (2012). Mejoramiento del cargue en el despacho de un centro de distribución utilizando superficies de respuesta. *Lasallistas de Investigación* 9(1), 70-85.
- [53] Valencia, D. (2000). Crisis y Futuro de la Ingeniería. *Ingeniería y Competitividad* 2(2), 35-43.
- [54] Peña, J. (2011). Grandes retos de la ingeniería y su papel en la sociedad. *Ingeniería e Investigación* 31, 100-111.
- [55] Bucci, N. & Terán, A. (2008). Nuevas responsabilidades de los ingenieros. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 12(47), 56-64.
- [56] González, S. (2011). Sistemas integrados de gestión, un reto para las pequeñas y medianas empresas. *Escenarios* 9(1), 69-89.
- [57] Castillo, D. & Martínez, J. (2010). Enfoque para combinar e integrar la gestión de sistemas. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [58] Harvard Business School. Faculty & Research. Online [Nov 2016].
- [59] Dess, G., Lumpkin, G. & Eisner, A. (2011). *Administración Estratégica, textos y casos*. Mc Graw Hill.



# Influencia de los sistemas normalizados de gestión en el logro de una ventaja competitiva sostenida

Elsa B. Gutiérrez N.<sup>1</sup>

María del C. Pérez O.<sup>2</sup>

Marianela Luzardo B.<sup>3</sup>

Universidad Pontificia Bolivariana  
Bucaramanga – Colombia

La globalización de la economía mundial, el desarrollo tecnológico, la movilización de la juventud en defensa del ecosistema y la existencia de consumidores más exigentes y conscientes que en el pasado, presionan al sector empresarial para trabajar en el mejoramiento continuo y en el cuidado de sus trabajadores y del medio ambiente. Esto ha llevado a la difusión de modelos normalizados de gestión entre las empresas, particularmente a la implementación extendida de sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001, de seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 (Hoy reemplazada por la norma ISO 45.001) y de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001. El presente trabajo evalúa el impacto para las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga de la implementación y certificación en estos tres modelos normalizados de gestión para el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015, evidenciada en una mayor rentabilidad Dupont frente al promedio del sector económico en Colombia. A partir de la información recopilada de 265 empresas de las 685 estudiadas, y de la aplicación de la prueba de diferencia de proporciones utilizando la distribución *t-student*, se pudo concluir al 10% de significancia que la implementación de los sistemas de gestión de calidad, seguridad y salud en el trabajo y gestión ambiental favoreció el logro de la ventaja competitiva sostenida para las empresas y periodo objeto de estudio, siendo especialmente determinante para algunos sectores económicos en particular. Esto evidencia el retorno de la inversión realizada por las empresas que han implementado y se han certificado en estos modelos normalizados de gestión.

## 1. INTRODUCCIÓN

El fortalecimiento del capitalismo, el libre comercio entre las naciones, la conformación de bloque económicos, la omnipresencia de las redes de comunicación instantánea y el desarrollo tecnológico se han convertido en ejes potenciadores de la economía mundial dentro de un mundo globalizado [1]. Lo anterior presiona el mejoramiento continuo en los negocios para garantizar su permanencia en el mercado y elevar sus índices de competitividad.

El incremento irracional de la explotación de recursos naturales en países desarrollados y en desarrollo, el aumento de la industrialización contaminante, la alteración de ecosistemas, la degradación y desertificación del suelo han generado un deterioro ambiental evidenciado en la afectación de suelos cultivables, el cambio climático y un manejo inadecuado de las cuencas híbridas [2]. Esto ha llevado a que especialmente los jóvenes tomen una mayor conciencia sobre el peligro que corre el planeta, y a su movilización, como nunca antes en la historia, en defensa del ecosistema [3]. Es así, que en los últimos años se ha promovido el concepto de Economía Circular, buscando equilibrar el crecimiento económico y la preservación del medio ambiente, a través de la integración de modelos de negocio con sistemas de fabricación sostenibles, el uso de energías renovables, y la reducción y regeneración de desechos [4].

Lo anterior, aunado a la existencia de múltiples intereses y actores que promueven la creación de grupos de presión mejor organizados y la formación de ciudadanos más consiente y exigente que en el pasado [5], ha llevado a que las empresas tomen una mayor conciencia sobre el impacto de sus operaciones sobre los diversos grupos de interés, preocupándose por la calidad de sus procesos y productos, la seguridad y bienestar de los trabajadores y su impacto ambiental.

En este contexto, ha tomado mayor relevancia la implementación e integración por parte de las empresas de modelos de gestión normalizados o estandarizados promovidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO), los cuales abarcan los sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001, de seguridad y salud en el trabajo bajo la norma ISO 45.001 (Anteriormente OHSAS 18.001) y de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001. Dadas las inversiones en tiempo y recursos que exige su implementación, se hace pertinente estudiar la relación que existe entre la certificación en estos sistemas de gestión y el logro de una ventaja competitiva sostenida a nivel empresarial.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo busca estudiar la incidencia de la implementación de los sistemas de gestión de calidad, seguridad y salud en el trabajo y gestión ambiental en el logro de una ventaja competitiva sostenida por parte de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga en los años 2013 a 2015, siendo medida la ventaja competitiva sostenida como la capacidad para superar la rentabilidad Dupont promedio de la industria en los tres años objeto de estudio. Para ello, se presentará un acercamiento a los conceptos

---

<sup>1</sup> [elsa.gutierrez@upb.edu.co](mailto:elsa.gutierrez@upb.edu.co)

<sup>2</sup> [maria.perezor@upb.edu.co](mailto:maria.perezor@upb.edu.co)

<sup>3</sup> [marianela.luzardo@upb.edu.co](mailto:marianela.luzardo@upb.edu.co)

de sistemas de gestión y ventaja competitiva, y posteriormente se estudiará la influencia de los sistemas normalizados de gestión en el logro de una ventaja competitiva a partir de la revisión de antecedentes de investigaciones sobre el tema y del análisis del comportamiento de las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga.

## 2. MARCO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL

### 2.1 Sistemas normalizados de Gestión

Un sistema de gestión (SG) se puede definir como un conjunto de procedimientos que la organización necesita seguir para alcanzar sus objetivos, o como un "proceso de sistematización de cómo se hacen las cosas" [6]. Desde 1987 hasta nuestros días, han aparecido modelos de gestión normalizados o estandarizados que son producto de la Organización Internacional de Normalización (ISO), los cuales se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Modelos de Gestión Normalizados (Adaptado de [7])

Fuente	Título	Versión	En Colombia
ISO 45.001 (Reemplaza OHSAS 18.001)	Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo.	2018	Icontec
OHSAS 18.001	Sistema de gestión de la salud ocupacional y la seguridad industrial. Requisitos	2017	Icontec
ISO 27.001	Sistema de gestión de la seguridad de la información	2017	Icontec
MECI 1.000	Modelo Estándar de Control Interno	2016	DAFP
ISO 9.001	Sistema de gestión de la calidad. Requisitos	2015	Icontec
NTCGP 1.000	Norma Técnica de Calidad en la Gestión Pública: sistema de gestión de la calidad para la rama ejecutiva del poder público y otras entidades prestadoras de servicio. Requisitos	2015	DAFP
ISO 14.001	Sistema de gestión ambiental: requisitos con orientación para su uso	2015	Icontec
ISO 26.000	Responsabilidad Social Corporativa	2012	Icontec
NTC 5.254	Gestión del riesgo	2012	Icontec

Los sistemas de gestión cuentan con tres componentes básicos [8]:

1. Elemento de revisión inicial: A partir de la identificación de los requisitos legales relacionados con los productos, servicios, el medio ambiente, la seguridad y la salud ocupacional, las obligaciones fiscales y sociales de la organización, busca identificar las partes interesadas para las cuales se debe dar cumplimiento a los requisitos y definir las implicaciones del no cumplimiento en cada uno de éstos.
2. Elemento estratégico: Se refiere a la formulación de misión, visión, políticas y objetivos que definen el norte de la compañía y los lineamientos que deberán seguir quienes la componen, hasta alcanzar los resultados esperados.
3. Elemento operativo: Corresponde a la implementación de la estrategia a partir de recursos humanos, materiales y económicos. En esta etapa se resalta el componente humano y de recursos en el cual se define la función y responsabilidad y la autoridad de todos los empleados de la organización, para que contribuyan al cumplimiento de los objetivos de la organización.

Los tres modelos más ampliamente implementados por las empresas privadas, son los sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001, de seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 y de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001 [9] [10] [11], modelos objeto de estudio de la presente investigación. El sistema de gestión de la calidad busca satisfacer al cliente para garantizar el equilibrio económico, la competitividad y los ingresos para las diferentes operaciones; mientras que el sistema de gestión en seguridad y salud ocupacional busca garantizar la disponibilidad de recurso humano libre de riesgos y sin enfermedades profesionales para la ejecución de las actividades; y el sistema de gestión ambiental protege el ambiente y previene la contaminación con lo cual garantiza el suministro de materia prima en equilibrio con el entorno [7]. Estos tres sistemas de gestión tienen una serie de aspectos en común que permiten estudiarlos en forma uniforme e integrarlos para efectos de su gestión, teniendo en cuenta el ciclo PHVA. Estos elementos son [8]:

- Establecer una política
- Fijar objetivos
- Definir responsabilidades y autoridades
- Efectuar la documentación de los procesos, actividades o tareas y mantener dicha documentación controlada
- Planificar las actividades y tareas a llevar a cabo para lograr los objetivos establecer procesos clave.
- Efectuar mediciones y seguimiento o monitoreo de procesos, actividades y tareas, llevar registros como evidencia de las actividades ejecutadas y controlar la gestión de los mismos, tomar precauciones para controlar aquellos resultados o procesos que no satisfacen las especificaciones.
- Tener prevista la toma de acciones correctivas y preventivas cuando alguna situación no funciona.
- Efectuar la evaluación del desempeño del sistema a través de auditorías.
- Revisar el sistema en forma periódica por parte de la dirección.

En junio de 2005 el comité técnico AEN/CTNE 66 Gestión de la Calidad y Evaluación de la Conformidad, cuya secretaría desempeña la Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, elaboraron la norma UNE

66.177 de junio de 2005: Sistemas de Gestión, Guía para la integración de los sistemas de gestión. El objetivo de esta norma es la de proporcionar directrices para desarrollar, implementar y evaluar el proceso de integración de los sistemas de gestión de la calidad, gestión ambiental y gestión de la seguridad y salud en el trabajo, de aquellas organizaciones que han decidido integrar dichos sistemas, ya sea total o parcialmente, para buscar una mayor eficacia en su gestión y aumentar su rentabilidad [12].

La integración de los sistemas de gestión permite ahorrar tiempo y recursos y asegurar una alineación entre las demandas de los diferentes estándares, solucionando problemas como la burocracia, la duplicación de tareas de trabajo, la dificultad de gestionar tareas y proyectos en diferentes unidades funcionales y departamentos y la confusión entre diferentes estándares [13]. Los sistemas integrados de gestión buscan mejorar la satisfacción de los *stakeholders* o grupos de interés y trae beneficios como la simplificación de los requerimientos del sistema, la reducción de la duplicación de políticas y procedimientos, la alineación de los objetivos de distintos sistemas, la reducción de la documentación, la realización de auditorías integradas y, por ende, una reducción de costos [8]. Sin embargo, la integración de los tres sistemas puede generar efectos contradictorios, porque puede haber incompatibilidades entre las demandas de calidad y eficiencia, con las demandas de seguridad [14].

## 2.2 Ventaja competitiva

Michael Porter define la ventaja competitiva como el "valor" que una empresa es capaz de generar para los clientes, medido como la cantidad que los clientes que están dispuestos a pagar por los productos de una empresa. Si este "valor" es superior a los costes de producción, se dice que el producto es competitivo [15]. La ventaja competitiva implica que las empresas satisfagan las necesidades de los consumidores de manera eficaz y eficiente, al ofrecer productos o servicios que los consumidores aprecien mucho por los cuales se puede cobrar un precio más elevado, o lograr menores costos que permiten cobrar precios menores [111].

Existe entonces una estrecha relación entre la ventaja competitiva y la rentabilidad, pues la eficacia y la eficiencia permiten elevar las utilidades al generar mayores ingresos o menores costos [111], lo que se espera redunde en una mayor rentabilidad que el promedio de otras empresas que compiten por los mismos clientes [17]. Los indicadores de rentabilidad, como el retorno sobre la inversión, han sido ampliamente utilizados para evaluar la ventaja competitiva, dado que permiten comparar firmas de diferente tamaño, aun cuando operen en mercados diferentes y usen estándares contables distintos [18].

A partir de la década de los ochenta hasta la actualidad se ha perfilado un modelo de planeación que enfatiza en dos grandes perspectivas sobre la formación de la estrategia, la perspectiva de producto-mercado y la teoría basada en recursos [19], las cuales se explican a continuación: La perspectiva de producto-mercado ha dado gran importancia a los determinantes contextuales de la competitividad a través de técnicas para el análisis de los sectores industriales y de la competencia [19]. Este es el caso del modelo de las cinco fuerzas competitivas propuesto en 1980 por Michael Porter en el libro *Competitive Strategy*, para analizar la evolución de la rentabilidad de los sectores económicos [20].

La teoría basada en recursos criticó el determinismo de la perspectiva de producto-mercado, haciendo énfasis en la habilidad de la empresa para influir el mercado mediante el desarrollo de nuevos productos y la innovación. Esta perspectiva puso el foco en explicar la formación y difusión del conocimiento organizacional como preocupación teórica central, por encima del énfasis en estudiar las acciones e intenciones de la competencia. Para esta teoría, el comportamiento competitivo es el resultado de ciertas características internas intrínsecas y únicas de la organización [19], de diferencias en los recursos, al igual que de variaciones en cómo éstos se convierten en capacidades y se aplican [21] [22], dado que ayudan a la organización a manejar su ambiente [18] [23].

El análisis de los recursos y capacidades de una empresa desarrollado por el enfoque de la "Visión basada en los recursos" (VBR) [24] [25] [26] [27], proporciona una base más estable para definir su identidad y formular estrategias, en comparación con las variables externas que están en continuo cambio [28]. Para ello, se sugiere realizar análisis internos como insumo para la formulación de las estrategias [17], con el fin de identificar y evaluar los recursos tangibles (recursos físicos y financieros), intangibles (tecnología, reputación, cultura) y humanos (habilidades, conocimientos, comunicación) de las organizaciones [29]. A partir de la Teoría de recursos y capacidades han surgido dos escuelas que dan explicaciones diferentes respecto al origen de las rentas de las empresas y de su ventaja competitiva [30]. La Escuela estructural, se centra fundamentalmente en el análisis de los atributos que deben poseer los recursos para alcanzar una ventaja competitiva [31] [122]. Por su parte, la Escuela de proceso, enfatiza en el estudio de las capacidades necesarias para la adquisición, desarrollo y generación de conocimiento [33] [34] [35].

La Escuela Estructural, dentro de la teoría basada en recursos y capacidades, estudia el éxito empresarial a partir del rol de las competencias centrales o habilidades distintivas (Core competencies en inglés) [19]. Las core competencies son "cualidades intrínsecas del grupo empresarial que lo impulsan al éxito económico", las cuales deben cumplir con tres requisitos: a) proveer acceso potencial a una amplia variedad de mercados, b) contribuir significativamente a los beneficios percibidos por el cliente del producto final y c) deben ser difíciles de imitar por los competidores [36].

En el año 1994, Gary Hamel y C.K. Prahalad en el libro "Competing for the Future" defienden la idea de que la ventaja competitiva de una empresa está dada por su visión de futuro, buscando aquello que puede efectuar mejor que sus

competidores y que es difícil de copiar por ellos. Estos autores proponen que la base de la ventaja competitiva futura dependerá de las estrategias implementadas por una empresa a partir de sus procesos de previsión, identificando y explotando las oportunidades y gestionando la consecución de los recursos que le faltan [37] [38].

### **2.3 Estudio de antecedentes sobre la relación de sistemas normalizados de gestión y ventaja competitiva**

Este estudio intenta evaluar la relación entre el logro de una ventaja competitiva sostenida y la implementación de modelos de gestión normalizados o estandarizados de la Organización Internacional de Normalización (ISO), como lo son los sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001, de seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 y de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001. Para el estudio de antecedentes de la investigación, se realizó una revisión bibliográfica de publicaciones en la base de datos Science Direct, haciendo uso de la ecuación de búsqueda "Management systems", para publicaciones con texto completo divulgadas desde el año 2013 en adelante.

Los estudios realizados sobre la implementación de los sistemas integrados de gestión, evidencian que los sistemas normalizados que más comúnmente integran las organizaciones son el sistema de gestión de calidad, de seguridad y salud en el trabajo y gestión ambiental. Así mismo, muestran una relación entre el papel de los modelos normalizados de gestión y el desempeño superior de las empresas y logro de una ventaja competitiva [39] [40] [41].

Diversas investigaciones han evaluado el impacto de la implementación de sistemas de gestión de calidad. Entre ellas, un estudio desarrollado en Eslovenia en el período 1987-2006, concluye que la certificación en ISO 9000 impulsa las ventas, las exportaciones y el empleo en las empresas certificadas. También tiene un efecto positivo en las ganancias, la relación de rentabilidad, la productividad laboral y los salarios, aunque estos efectos aparecen con el tiempo [42]. En este sentido, un estudio realizado en empresas manufactureras, revela que, aunque las ventas de las empresas certificadas en ISO 9000 incrementan en la medida en que el sistema estandarizado de gestión se institucionaliza cada vez más, al mismo tiempo la eficiencia operativa y el valor para el accionista se deteriora [43]. Así mismo, un estudio realizado en el periodo 2000 a 2013 en la Unión Europea, no encontró un impacto de la certificación de calidad ISO 9000 sobre la productividad laboral en estos países, tanto en los períodos anteriores, como durante y posteriormente a la crisis [44].

De otra parte, un estudio con la participación de 220 organizaciones australianas, demostró que la certificación en ISO 9000 tiene un impacto positivo y significativo en las medidas de rendimiento de innovación de procesos, como la reestructuración y los procesos de cooperación y de establecimiento de estructuras planas a partir del concepto de cliente interno. Sin embargo, esta certificación no mostró una relación estadísticamente significativa con las medidas de rendimiento de innovación de productos, como el tiempo de comercialización de nuevos productos [45]. Finalmente, otra investigación sobre la implementación de la ISO 9000 encontró que las empresas que carecen de un Sistema de Gestión de Calidad preexistente, pero que están sujetas a la presión externa para adoptar esta norma, es más probable que mejoren sustancialmente el rendimiento de sus operaciones a través de la implementación de la ISO 9000. Mientras que en aquellas empresas que tienen un sistema de gestión de calidad preexistente y adoptan la ISO 9000, su mejor desempeño operativo no se puede atribuir necesariamente a la implementación de la ISO 9000 únicamente [46].

Las empresas que operan en entornos de gestión de calidad total (TQM) tienen más probabilidades de adoptar un sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo, frente a aquellas que aplican prácticas clave de gestión de seguridad de forma aislada [47]. Una investigación realizada entre 211 empresas manufactureras en Estados Unidos con certificación OHSAS 18001, concluye que esta certificación genera beneficios significativos en seguridad y en los componentes económicos del desempeño operacional, incluso entre empresas que operan en entornos con estricta regulación de seguridad, que ya tenía una seguridad superior a la media de su industria. Esta certificación impacta positivamente el crecimiento en ventas, la productividad laboral y la rentabilidad ROA, y estos beneficios aumentan en empresas con sistemas de producción altamente complejos [48].

Con los años, las empresas son cada vez más conscientes de la importancia de la preservación del medio ambiente. Un estudio realizado entre empresas de América del Norte y de Europa Occidental reveló que la principal motivación que estas empresas tienen de adoptar sistemas de gestión ambiental basados en la norma ISO 14.000, obedece al deseo de reducir los impactos ambientales de la cadena de suministro, y no como respuesta a exigencias legales [49]. Una revisión bibliográfica de publicaciones científicas encontró que los principales aspectos de los sistemas de gestión ambiental incorporados por las pequeñas y medianas empresas fueron la certificación, los análisis de fallas e implementación de mejoras, la responsabilidad ambiental y la mitigación de impactos. La mayoría de los artículos consultados por este estudio reconocen los altos costos de la implementación de los sistemas de gestión ambiental, pero destacan los resultados alcanzados por las empresas que los implementan, como las ganancias morales, la reducción de costos, la sostenibilidad en el mediano plazo, la mejora en la imagen y la adquisición de nuevos clientes, lo cual permite prever la posibilidad de adquirir ventajas competitivas a través de los sistemas de gestión ambiental [50].

Finalmente, en relación con los sistemas integrados de gestión (SIG), un estudio sobre la evolución de la investigación sobre el tema a partir de las publicaciones realizadas en el Journal of Cleaner Production (JCP), evidencia la existencia de múltiples estudios sobre el análisis de niveles de integración y motivaciones, beneficios y dificultades de la

implementación de SIG y la relación de los SIG con la gestión de la innovación, la estrategia, el rendimiento y el desarrollo sostenible. A pesar de esto, resalta lagunas en la literatura, particularmente por la falta de estudios acerca de los SIG y el rendimiento (principalmente el desempeño ambiental), los SIG y la sostenibilidad, los métodos y directrices para los SIG basados en evidencias empíricas, el análisis de los niveles de integración y motivaciones, los beneficios y dificultades teniendo en cuenta la estrategia de implementación adoptada, los SIG y la gestión de la innovación y finalmente, los SIG y la responsabilidad social [51].

La implementación de los sistemas integrados de gestión apoya la articulación de la estrategia empresarial y su focalización en las fuerzas económicas, ambientales y sociales, lo cual se convierte en fuente de ventaja competitiva [40]. Una investigación realizada desde la teoría de la visión de la empresa basada en recursos en empresas de manufactura en Italia, concluye que los activos de control de la contaminación y las inversiones en seguridad son los principales recursos básicos que proporcionan a los sistemas integrados de gestión una base potencial para mejorar el rendimiento operacional de las empresas [52]. Otro estudio encontró que los sistemas de gestión integrados como respaldo a un enfoque proactivo y un compromiso con la producción más limpia en las organizaciones, aportan ahorros relevantes para las organizaciones, además de proporcionar valor a las partes interesadas relevantes [53]. Por último, una investigación realizada entre pequeñas empresas del sector de restaurantes, concluyó que las prácticas de gestión de la calidad tienen un impacto directo significativo en los factores de éxito del mercado, pero no en estados de pérdidas y ganancias de las empresas; mientras que encontró una relación significativa entre las prácticas de gestión del medio ambiente y el rendimiento financiero. El artículo sugiere que ser proactivo en temas de calidad y medioambientales puede brindar a las pequeñas empresas de servicios una gran cantidad de beneficios que mejoran su competitividad [54].

### 3. MÉTODO

La investigación documental que se presenta tiene un alcance de tipo comparativo, y buscó responder a la pregunta de investigación: ¿Existen diferencias en el logro de la ventaja competitiva entre las empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia) certificadas en modelos estandarizados de gestión bajo las normas ISO 9.001, OHSAS 18.001 e ISO 14.001, frente a las que no están certificadas? En este sentido, se establece la hipótesis de la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre estos dos grupos de empresas, tanto de manera consolidada como por sector. Para la clasificación de las medianas y grandes empresas, se tomó como referencia el valor de los activos al año 2016 de las empresas objeto de estudio y la clasificación establecida en la Ley 905 de agosto 2 de 2004 de la República de Colombia, la cual se detalla en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Clasificación de empresas según su tamaño [55]

Tipo de Empresa	Empleados	Valor de Activos SMMLV
Microempresas	No superior a los 10 trabajadores	Inferior a 500 SMMLV
Pequeña	Entre 11 y 50 trabajadores	Entre 501 y 5.000 SMMLV
Mediana	Entre 51 y 200 trabajadores	Entre 5.001 y 30.000 SMMLV
Gran Empresa	Superior a 200 trabajadores	Más de 30.001 SMMLV

Para obtener la población objetivo se tomó como criterio de inclusión a las medianas y grandes empresas con sede principal en los cuatro municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) que renovaron su matrícula mercantil y reportaron información financiera a la Cámara de Comercio de Bucaramanga en los años 2013, 2014 y 2105, siendo determinada una población de 685 empresas, como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Población objetivo y muestra

Sector	Población	Población por Sector	Muestra propuesta	Muestra Real	% Muestra Real por sector
Actividades inmobiliarias	45	6,6%	13	13	28,9%
Alojamiento y servicios de comida	9	1,3%	3	6	66,7%
Bancos	23	3,4%	7	7	30,4%
Comercio al por mayor	214	31,2%	61	61	28,5%
Construcción	157	22,9%	44	44	28,0%
Consultoría y arquitectura	31	4,5%	9	18	58,1%
Distribución de agua y evaluación	8	1,2%	2	7	87,5%
Ganadería, caza y silvicultura	61	8,9%	17	17	27,9%
Información y comunicación	9	1,3%	3	5	55,6%
Otras dependencias	42	6,1%	12	30	71,4%
Salud	35	5,1%	10	27	77,1%
Suministros de electricidad, gas	11	1,6%	3	10	90,9%
Transporte y almacenamiento	40	5,8%	11	20	50,0%
Consolidado	685	100,0%	194	265	38,7%

A partir del muestreo estratificado se calculó la muestra ideal a tener en cuenta en el estudio con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 90%, la cual fue equivalente a 194 empresas distribuidas en los 13 sectores económicos estudiados. Finalmente, se logró recolectar información de 265 empresas, logrando superar la muestra

representativa propuesta para todos los sectores económicos. La distribución de la población, la muestra propuesta y la muestra real por sector económico se puede observar en la Tabla 3. Teniendo en cuenta la limitada información financiera que reportan las empresas a la Cámara de Comercio de Bucaramanga, se estableció el índice de rentabilidad Dupont como el criterio bajo el cual se clasificaron las empresas que lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013-2015. El índice Dupont reúne el estado de situación financiera y el estado de resultados a través de sus componentes, los cuales permiten analizar qué tanto de cada venta es ganancia para las empresas, que tan eficientes han sido en administrar sus activos y el uso de apalancamiento financiero [144]. El índice de rentabilidad Dupont se calcula según las ecuaciones (1), (2) o (3).

$$\text{Dupont} = \text{Margen sobre Ventas} \times \text{Rotación de Activos} \quad (1)$$

$$\text{Dupont} = \frac{\text{Utilidad Neta}}{\text{Ventas}} \times \frac{\text{Ventas}}{\text{Activos}} \quad (2)$$

$$\text{Dupont} = \frac{\text{Utilidad Neta}}{\text{Activos}} \quad (3)$$

A partir de la investigación del índice Dupont promedio por sector económico de todas las empresas a nivel nacional publicado en la base de datos Benchmark para Colombia, se identificaron las medianas y grandes empresas del A.M.B. que lograron un índice de rentabilidad Dupont superior al promedio de las empresas de su respectivo sector a nivel nacional en los tres años de estudio (2013, 2014 y 2015), lo que permitió clasificarlas en dos grupos: empresas que lograron una ventaja competitiva sostenida (VC) y empresas sin ventaja competitiva sostenida (NVC).

Para la investigación documental presentada se utilizaron como fuentes de información los reportes financieros de la Cámara de Comercio de Bucaramanga y de Benchmark para identificar el perfil financiero de las empresas (VC y NVC) y la información publicada por las empresas en internet (portal web e informes públicos) para identificar las empresas con certificaciones en sistemas normalizados de gestión. A partir de las fuentes de información consultadas, se realizó un análisis de cuáles de las empresas VC y NVC contaban con certificaciones vigentes en los sistemas normalizados de gestión estudiados. Con el fin de probar la existencia de diferencias estadísticamente significativa entre la proporción de empresas VC y NVC en cada una de las certificaciones estudiadas, tanto de manera consolidada como por sector, se utilizó la distribución t-student con niveles de confianza del 90%, 95% y 99%, para lo cual se realizó el procesamiento de datos estadísticos con el software Minitab-v17® [57] [58].

#### 4. RESULTADOS

El Área Metropolitana de Bucaramanga (Departamento de Santander, Colombia) cuenta con 685 medianas y grandes con sede principal en los cuatro municipios del área (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) que permanecieron activas y reportaron información financiera a la Cámara de Comercio de Bucaramanga en los años 2013, 2014 y 2015, de las cuales sobresalen los sectores de Comercio al por Mayor y Construcción, que representan el 31.2% y el 22.9% de las empresas, y se resalta la ausencia de empresas manufactureras que cumplan estos requisitos (Ver Tabla 3).

A partir de la evaluación financiera de las 265 empresas estudiadas como muestra, se identificaron 105 empresas que lograron superar el índice de rentabilidad promedio Dupont del sector económico a nivel nacional en los tres años de estudio, denominadas en el estudio "Empresas con ventaja competitiva sostenida (VC)" y 160 empresas que no lo lograron, denotadas como "Empresas que no lograron una ventaja competitiva sostenida (NVC)". Se resalta el desempeño de los siguientes sectores, en los cuales un porcentaje mayor o igual al 50% de las empresas logró una ventaja competitiva sostenida en el periodo, ordenados de mayor a menor: Alojamiento y Servicios de Comida, Consultoría y Arquitectura, Información y Comunicación, Bancos y Salud (Ver Tabla 4).

**Tabla 4.** Análisis de empresas que lograron o no una ventaja competitiva sostenida por sector

Sector	Muestra	Empresas VC		Empresas NVC	
		No.	%	No.	%
Actividades inmobiliarias	13	3	23,1	10	76,9
Alojamiento y servicios de comida	6	4	66,7	2	33,3
Bancos	7	4	57,1	3	42,9
Comercio al por mayor	61	28	45,9	33	54,1
Construcción	44	10	22,7	34	77,3
Consultoría y arquitectura	18	11	61,1	7	38,9
Distribución de agua y evaluación	7	3	42,9	4	57,1
Ganadería, caza y silvicultura	17	5	29,4	12	70,6
Información y comunicación	5	3	60,0	2	40,0
Otras dependencias	30	12	40,0	18	60,0
Salud	27	15	55,6	12	44,4
Suministros de electricidad, gas	10	4	40,0	6	60,0
Transporte y almacenamiento	20	3	15,0	17	85,0
Consolidado	265	105	39,6	160	60,4

Los sistemas normalizados de gestión complementan los procesos de dirección estratégica, al establecer objetivos asociados a la satisfacción de diferentes grupos de interés de la organización y formular, implementar y controlar

planes y programas para hacerlos realidad, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad organizacional. Dado lo anterior, se realizó una evaluación del impacto en el logro de una ventaja competitiva sostenida por parte de las empresas que acreditan o no certificaciones en los tres sistemas estandarizados de gestión con mayor difusión a nivel empresarial en Colombia: gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001, gestión de la seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 y gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001. En primera instancia, se hizo la comparación consolidada del comportamiento del 100% de las empresas VC frente al 100% de las NVC, independientemente del sector al que pertenecen, para determinar si la proporción de empresas que acreditan certificaciones en sistemas normalizados de gestión y lograron tener una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 (VC) es estadísticamente diferente a la proporción de empresas certificadas que no lograron una ventaja competitiva sostenida (NVC).

En el consolidado de empresas estudiadas que acreditan certificación en sistemas de gestión de calidad (ISO 9.001), seguridad y salud en el trabajo (OHSAS 18.001) y gestión ambiental (ISO 14.001) se presenta una diferencia del 15%, 11,6% y 9,6% entre la proporción de las compañías certificadas con VC y NVC respectivamente, como se evidencia en la Figura 1 y en los datos consolidados de las Tablas 5, 6 y 7. Estos resultados permite concluir que la rigurosa implementación de estos tres sistemas estandarizados de gestión evidencias en las certificaciones correspondiente, favoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2.013 a 2.015 en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga, dado que el valor de la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student fue estadísticamente significativa al 5% (p-valor<0,05).



**Figura 1.** Comparación del desempeño según tipo de Certificación en Sistemas de Gestión

Para cada sistema normalizado de gestión se presenta en los siguientes numerales el análisis por sector económico, para lo cual se muestra por cada grupo de empresas estudiadas (Empresas que lograron -VC- y no lograron una ventaja competitiva en el periodo 2013 a 2015 -NVC-), el número total de empresas, el número de empresas certificadas y la proporción de empresas certificadas frente al total de empresas del grupo. Así mismo, se presenta la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC que acreditan la certificación en cada norma (%VC-NVC), y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student. Se aclara que no se incluye el valor de la prueba P cuando la diferencia entre proporciones es cero o la muestra es muy pequeña. Se somborean en gris las diferencias estadísticamente significativas al 1%, 5% y 10%, sobre las que se concluye.

#### 4.1 Influencia de los sistemas de gestión de calidad bajo ISO 9001 en el logro de una ventaja competitiva

En la Tabla 5 se presenta un análisis por sector económico del comparativo del desempeño de las empresas certificadas en sistemas de gestión de calidad bajo ISO 9001, frente a las que no están certificadas.

**Tabla 5.** Comparativo del desempeño por sectores de empresas con certificación en sistemas de gestión de calidad ISO 9.001

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas Certificadas VC		Total empresas NVC	Empresas Certificadas NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	0	0,00%	10	0	0,00%	0,00%	**
Alojamiento y servicios de comida	4	1	25,00%	2	1	50,00%	-25,00%	0,546
Bancos	4	1	25,00%	3	0	0,00%	25,00%	0,248
Comercio al por mayor	28	11	39,29%	33	5	15,15%	24,13%	0,030
Construcción	10	5	50,00%	34	8	23,53%	26,47%	0,128
Consultoría y arquitectura	11	8	72,73%	7	4	57,14%	15,58%	0,499
Distribución de agua y evaluación	3	3	100,00%	4	3	75,00%	25,00%	0,248
Ganadería, caza y silvicultura	5	0	0,00%	12	4	33,33%	-33,33%	0,013
Información y comunicación	3	1	33,33%	2	2	100,00%	-66,67%	0,014
Otras dependencias	12	6	50,00%	18	1	5,56%	44,44%	0,004
Salud	15	2	13,33%	12	1	8,33%	5,00%	0,673
Suministros de electricidad, gas	4	3	75,00%	6	3	50,00%	25,00%	0,401
Transporte y almacenamiento	3	1	33,33%	17	8	47,06%	-13,73%	0,645
Consolidado	105	42	40,00%	160	40	25,00%	15,00%	0,011

Al analizar la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC que acreditan la certificación en cada norma (%VC-NVC) por sector económico, y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student (Ver tabla 5), se concluye que contar con una certificación en sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001 favorece el logro de una ventaja competitiva sostenida en el consolidado de empresas estudiada y particularmente en los sectores de Comercio al por mayor y Otras dependencias (p-valor<0,05), mientras que desfavorece a los sectores de Ganadería, Caza y Silvicultura e Información y Comunicación (p-valor<0,01).

#### 4.2 Influencia de los sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo bajo OHSAS 18001 en el logro de una ventaja competitiva sostenida

En la Tabla 6 se presenta un análisis por sector económico del comparativo del desempeño de las empresas certificadas en sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001, frente al desempeño de las empresas que no están certificadas; para lo cual se muestra la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC que acreditan la certificación en cada norma (%VC-NVC), y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student.

**Tabla 6.** Comparativo del desempeño por sectores de empresas con certificación OHSAS 18001

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas Certificadas VC		Total empresas NVC	Empresas Certificadas NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	0	0,00%	10	0	0,00%	0,00%	**
Alojamiento y servicios de comida	4	0	0,00%	2	0	0,00%	0,00%	**
Bancos	4	0	0,00%	3	0	0,00%	0,00%	**
Comercio al por mayor	28	1	3,57%	33	1	3,03%	0,54%	0,906
Construcción	10	5	50,00%	34	5	14,71%	35,29%	0,037
Consultoría y arquitectura	11	8	72,73%	7	3	42,86%	29,87%	0,195
Distribución de agua y evaluación	3	2	66,67%	4	1	25,00%	41,67%	0,231
Ganadería, caza y silvicultura	5	1	20,00%	12	1	8,33%	11,67%	0,551
Información y comunicación	3	1	33,33%	2	1	50,00%	-16,67%	0,709
Otras dependencias	12	4	33,33%	18	1	5,56%	27,78%	0,050
Salud	15	2	13,33%	12	0	0,00%	13,33%	0,129
Suministros de electricidad, gas	4	1	25,00%	6	1	16,67%	8,33%	0,753
Transporte y almacenamiento	3	1	33,33%	17	7	41,18%	-7,84%	0,792
Consolidado	105	26	24,76%	160	21	13,13%	11,64%	0,020

Al realizar un análisis por sector económico se evidencia que contar con una certificación en sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 favoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 en el consolidado de medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga estudiadas y particularmente en los sectores de Construcción (p-valor<0,05) y Otras Dependencias (p-valor<0,1) y no desfavoreció a ninguno de los sectores económico en el periodo de estudio (Ver Tabla 6).

#### 4.3 Influencia de los sistemas de gestión ambiental bajo ISO 14001 en el logro de una ventaja competitiva sostenida

En la Tabla 7 se presenta un análisis por sector del comparativo del desempeño de las empresas certificadas en sistemas de gestión ambiental bajo ISO 14.001, frente al desempeño de las empresas que no están certificadas.

**Tabla 7.** Comparativo del desempeño por sectores de empresas con certificación ISO 14001

Sector	Empresas con Ventaja Competitiva Sostenida (VC)			Empresas sin Ventaja Competitiva (NVC)			% Empresas Certificadas VC-NVC	P
	Total Empresas VC	Empresas Certificadas VC		Total empresas NVC	Empresas Certificadas NVC			
		No.	%		No.	%		
Actividades inmobiliarias	3	0	0,00%	10	0	0,00%	0,00%	**
Alojamiento y servicios de comida	4	0	0,00%	2	0	0,00%	0,00%	**
Bancos	4	0	0,00%	3	0	0,00%	0,00%	**
Comercio al por mayor	28	1	3,57%	33	1	3,03%	0,54%	0,906
Construcción	10	4	40,00%	34	4	11,76%	28,24%	0,086
Consultoría y arquitectura	11	8	72,73%	7	3	42,86%	29,87%	0,195
Distribución de agua y evaluación	3	2	66,67%	4	1	25,00%	41,67%	0,231
Ganadería, caza y silvicultura	5	0	0,00%	12	0	0,00%	0,00%	**
Información y comunicación	3	1	33,33%	2	1	50,00%	-16,67%	0,709
Otras dependencias	12	4	33,33%	18	0	0,00%	33,33%	0,014
Salud	15	0	0,00%	12	1	8,33%	-8,33%	0,296
Suministros de electricidad, gas	4	1	25,00%	6	0	0,00%	25,00%	0,248
Transporte y almacenamiento	3	1	33,33%	17	7	41,18%	-7,84%	0,792
Consolidado	105	22	20,95%	160	18	11,25%	9,70%	0,039



Al analizar la diferencia de proporciones entre las empresas VC y NVC que acreditan la certificación en cada norma (%VC-NVC) por sector económico, y el valor P resultante de aplicar la prueba de diferencia de proporciones con la distribución t-student (Ver tabla 7), se concluye que contar con una certificación en sistemas de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001 favoreció el logro de una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para el consolidado de empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga estudiadas y particularmente para los sectores de Construcción ( $p\text{-value}<0,10$ ) y Otras Dependencias ( $p\text{-valor}\leq 0,01$ ). Así mismo, se concluye que contar con esta certificación no desfavoreció el desempeño de ninguno de los sectores económicos en el periodo.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La evaluación de las diferencias entre la proporción de las empresas medianas y grandes de del Área Metropolitana de Bucaramanga que lograron y no lograron una ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 (VC y NVC) para el consolidado de las empresas objeto de estudio, permite corroborar la hipótesis al 10% de significancia según la prueba t-student de que existen diferencias en el logro de la ventaja competitiva sostenida entre las empresas medianas y grandes del Área Metropolitana de Bucaramanga (Colombia) certificadas en modelos estandarizados de gestión bajo las normas ISO 9.001, OHSAS 18.001 e ISO 14.001, frente a las que no están certificadas. Adicionalmente, el análisis por sector económico permite concluir lo siguiente:

- Acreditar certificaciones en sistemas de gestión de calidad bajo la norma ISO 9.001 es un factor que favoreció el logro de la ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para las empresas de los sectores de Comercio al por mayor y Otras dependencias. Por su parte, este factor desfavoreció el logro de la ventaja competitiva sostenida en el periodo evaluado en los sectores de Ganadería, Caza y Silvicultura e Información y Comunicación.
- Acreditar certificaciones en sistemas de gestión en seguridad y salud en el trabajo bajo la norma OHSAS 18.001 fue un factor determinante para el logro de la ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga de los sectores de Construcción y Otras Dependencias. Así mismo, se concluye que este tipo de certificación no desfavoreció a ninguno de los sectores de la población objeto de estudio.
- Por último, acreditar certificaciones en sistemas de gestión ambiental bajo la norma ISO 14.001 es un factor que favoreció el logro de la ventaja competitiva sostenida en el periodo 2013 a 2015 para las empresas objeto de estudio de los sectores de Construcción y Otras Dependencias, siendo este un factor que no desfavoreció a ninguno de los sectores económicos en el periodo evaluado.

A diferencia de otros estudios que evalúan el impacto de los sistemas de gestión de calidad, de seguridad y salud en el trabajo y de gestión ambiental en el incremento de la rentabilidad empresarial [42] [48] [52] [53], la presente investigación estudia el aporte de estos sistemas de gestión al logro de una rentabilidad superior al promedio de la industria de manera sostenida en el tiempo. En este sentido, se concluye que existe una estrecha relación entre el logro de una ventaja competitiva sostenida y la implementación de los modelos de gestión estandarizados basados en las normas ISO 9.001, ISO 14.001 y OHSAS 18.001. Estos resultados contradice el estudio realizado por Lo y Yeung, quienes encontraron que en la medida en que en las empresas manufactureras certificadas en ISO 9000 se institucionalizaba más el sistema de gestión de calidad, la eficiencia operativa y el valor para el accionista se deterioraba [43]. Adicionalmente, contradice los hallazgos encontrados por Llach, Perramon, Alonso-Almeida, y Bagur-Femenías, quienes concluyen que los sistemas de gestión de calidad no tienen un impacto en los estados de pérdidas y ganancias de las empresas [54].

En coherencia con el enfoque teórico de la Visión de la empresa Basada en Recursos (VBR) [33] [24] [36] [122] [22] [25] [26] [27] y los postulados que asocian la previsión y la estrategia con el logro de la ventaja competitiva [37] [38], los recursos y capacidades requeridos para la implementación de los sistemas de gestión de calidad, seguridad y salud en el trabajo, y gestión ambiental y la toma de decisiones estratégica que se desprende estos sistemas de gestión en pro de mejorar la satisfacción de los diferentes grupos de interés, favorecen el logro de un desempeño superior por parte de las medianas y grandes empresas frente a su competencia. Esto hace que sea atractiva la certificación en estos modelos, pues se evidencia el retorno de la inversión realizada en tiempo y dinero para su implementación.

La escasa publicación de estudios sobre el impacto a mediano plazo de la implementación de los modelos normalizados de gestión fue un limitante para el desarrollo del presente estudio, pero a su vez refleja el aporte novedoso de esta investigación. La ampliación de esta investigación a otros municipios del Departamento de Santander u otros departamentos de Colombia se constituye en oportunidades para futuras líneas de investigación, así como la complementación del estudio con la evaluación del impacto de otros modelos normalizados de gestión en el logro de una ventaja competitiva sostenida.

### Agradecimientos

El estudio presentado hace parte de los resultados derivados del proyecto de investigación “Caracterización del proceso de administración estratégica en las medianas y grandes empresas del Área Metropolitana de Bucaramanga que lograron desarrollar una Ventaja Competitiva en el periodo comprendido entre el año 2013 y el 2015”, (Código 026-0716-2200), patrocinado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

## REFERENCIAS

- [1] Muñoz, J. (2003). Sobre las tendencias de la Administración. Algunas reflexiones preliminares. *Revista Académica e Institucional de la U.C.R.*, 112-133.
- [2] Bucci, N. & Terán, A. (2008). Nuevas responsabilidades de los ingenieros. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 12(47), 35-43.
- [3] Peña, J. (2011). Grandes retos de la ingeniería y su papel en la sociedad. *Ingeniería e Investigación* 31, 100-111.
- [4] Jensen, J. & Remmen, A. (2017). Enabling circular economy through product stewardship. *Procedia Manufacturing* 8, 377-384.
- [5] Valencia, D. (2000). Crisis y Futuro de la Ingeniería. *Ingeniería y Competitividad* 2(2), 1-6.
- [6] [International Organization for Standardization](#).
- [7] González, S. (2011). Sistemas integrados de gestión, un reto para las pequeñas y medianas empresas. *Escenarios* 9(1), 69-89.
- [8] Castillo, D. & Martínez, J. (2010). Enfoque para combinar e integrar la gestión de sistemas. *Icontec*.
- [9] Zutshi, A. & Sohal, A. (2005). Integrated management systems: The experiences of three Australian organizations. *Journal of Manufacturing Technology Management* 16(2), 211-232.
- [10] Zeng, S., Shi, J. & Lou, G. (2007). A synergetic model for implementing an integrated management system: an empirical study in China. *Journal of Cleaner Production* 15, 1760-1767.
- [11] Oliveira, O. (2013). Guidelines for the integration of certifiable management systems in industrial companies. *Journal of Cleaner Production* 57, 124-133.
- [12] AENOR UNE 66177 (2005). Sistemas de gestión. Guía para la integración de sistemas de gestión. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [13] Jørgensen, T., Remmen, A. & Mellado, M. (2006). Integrated management systems e three different levels of integration. *Journal of Cleaner Production* 14, 713-722.
- [14] Sanz, J. et al. (2015). Analysis on integrated management of the quality, environment and safety on the industrial projects. *Procedia Engineering* 132, 140-145.
- [15] Porter, M. (2015). *Ventaja Competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño superior*. Equipo Editorial Patria.
- [16] Thompson, A. (2012). *Administración Estratégica Teoría y Casos*. McGraw-Hill.
- [17] Hill, C. & Jones, G. (2011). *Administración Estratégica, Un enfoque integral*. Cengage Learning.
- [18] Ynzunza, C. & Izar, J. (2013). Efecto de las estrategias competitivas y los recursos y capacidades orientados al mercado sobre el crecimiento de las organizaciones. *Contaduría y administración* 58(1), 169-197.
- [19] Álvarez, M. (2003). Competencias Centrales y Ventaja Competitiva: el concepto, su evolución y su aplicabilidad. *Contaduría y Administración* 209, 5-22.
- [20] Harvard Business School. [Faculty & Research](#). Online [Nov 2017].
- [21] Barney, J. (1986). Strategic factors markets, expectations, luck, and business strategy. *Management Science* 32(10), 1231-1241.
- [22] Grant, R. (1991). The resource based theory of competitive advantage: Implications for strategy formulation. *California Management Review* 33(3), 114-135.
- [23] Day, G. (1994). The Capabilities of Market Driven Organizations. *Journal of Marketing* 58(4), 37-52.
- [24] Teece, D. (1986). Profiting from Technological Innovation: Implications for Integration, Collaboration, Licensing and Public Policy. *Research Policy* 15(6), 285-305.
- [25] Amit, R. & Schoemaker, T. (1993). Strategic Assets and Organizational Rent. *Strategic Management Journal* 14(1), 33-46.
- [26] Peteraf, M. (1993). The Cornerstones of Competitive Advantage: A Resource Based-View. *Strategic Management Journal* 14(3), 179-191.
- [27] Martínez, R., Charterina, J. & Araujo, A. (2010). Un modelo causal de competitividad empresarial planeado desde la VBR: capacidades directivas, de innovación y calidad. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 16(2), 165-188.
- [28] David, F. (2003). *Conceptos de Administración Estratégica*. Pearson.
- [29] Planellas, M. & Muni, A. (2015). *Las Decisiones Estratégicas*. Penguin.
- [30] Calix, C., Vigier, H. & Briozzo, A. (2015). Capital intelectual y otros determinantes de la ventaja competitiva en empresas exportadoras de la zona norte de Honduras. *Suma de Negocios* 6(14), 130-137.
- [31] Schulze, W. (1994). The two schools of thought in resource-based theory: Definitions and implications for research. *Advances in Strategic Management* 10, 127-151.
- [32] Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management* 17, 99-120.
- [33] Wernerfelt, B. (1984). A resource-based view of the firm. *Strategic Management Journal* 5, 171-180.
- [34] Nonaka, I. (1991). The knowledge-creating company. *Harvard Business Review* 69, 96-104.
- [35] Teece, D. (1998). Research directions for Knowledge management. *California Management Review* 40, 289-292.
- [36] Prahalad, C. & Hamel, G. (1990). The core competence of the corporation. *Harvard Business Review* 1, 79-91.
- [37] Hamel, G. & Prahalad, C. (1996). *Compiendo por el futuro*. Harvard Business School Press.
- [38] Hamel, G. & Heene, A. (1994). *The Concept of Core Competence*. Wiley.
- [39] Cabrera, H. et al. (2015). La integración de Sistemas de Gestión Empresariales, conceptos, enfoques y tendencias. *Ciencias de la Información* 46(3), 3-8.
- [40] Castka, A. & Balzarova, M. (2017). An exploration of interventions in ISO 9001 and ISO 14001 certification context - A multiple case study approach. *Journal of Cleaner Production* 174, 1642-1652.
- [41] Vidal, E. & Soto, E. (2013). Implantación de los Sistemas Integrados de Gestión. *Tourism & Management Studies* 4, 1112-1121.
- [42] Javorcik, B. & Sawada, N. (2018). The ISO 9000 certification: Little pain, big gain? *European Econo. Review* 105, 103-114.
- [43] Lo, C. & Yeung, A. (2018). Quality management standards, institutionalization and organizational implications: A longitudinal analysis. *International Journal of Production Economics* 200, 231-239.

- [44] Albulescu, C. et al. (2016). Does ISO 9001 Quality Certification Influence Labor Productivity in EU-27. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 221, 278-286.
- [45] Terziovski, M. & Guerrero, J. (2014). ISO 9000 quality system certification and its impact on product and process innovation performance. *International Journal of Production Economics* 158, 197-207.
- [46] Cai, S. & Jun, M. (2018). A qualitative study of the internalization of ISO 9000 standards: The linkages among firms' motivations, internalization processes, and performance. *International Journal of Production Economics* 196, 248-260.
- [47] Álvarez, J. et al. (2018). Safety Management System in TQM environments. *Safety Science* 101, 135-143.
- [48] Lo, C. et al. (2014). OHSAS 18001 certification and operating performance: The role of complexity and coupling. *Journal of Operations Management* 32, 268-280.
- [49] Wiengarten, F., Pagell, M. & Fynes, B. (2013). ISO 14000 certification and investments in environmental supply chain management practices: identifying differences in motivation and adoption levels between Western European and North American companies. *Journal of Cleaner Production* 56, 18-28.
- [50] Aisenberg, H. et al. (2014). Environmental management systems in small and medium-sized enterprises: an analysis and systematic review. *Journal of Cleaner Production* 74, 44-53.
- [51] Vieira, T., Ferreira, L. & de Oliveira, O. (2016). Evolution of integrated management systems research on the Journal of Cleaner Production: Identification of contributions and gaps in the literature. *Journal of Cleaner Production* 139, 1234-1244.
- [52] Savino, M. & Batbaatar, E. (2015). Investigating the resources for Integrated Management Systems within resource-based and contingency perspective in manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production* 104, 392-402.
- [53] Ferreira, M., Santos, G. & Silva, R. (2016). Integration of management systems: towards a sustained success and development of organizations. *Journal of Cleaner Production* 127, 96-111.
- [54] Llach, J. et al. (2013). Joint impact of quality and environmental practices on firm performance in small service businesses: an empirical study of restaurants. *Journal of Cleaner Production* 44, 96-104.
- [55] Ley 905 (2004). Por medio de la cual se modifica la Ley 590 de 2000 sobre promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana y se dictan otras disposiciones. Colombia.
- [56] Menjivar, C., Miranda, E., & Molina, C. (2014). Medición de la rentabilidad basado en el sistema Dupont, para las pequeñas y medianas empresas comercializadoras de productos de ferretería del municipio de San Salvador. Universidad del Salvador.
- [57] Ilzarbe, L. et al. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta. *Tecnura* 10(20), 127-138.
- [58] Gómez, R. & Correa, A. (2012). Mejoramiento del cargue en el despacho de un centro de distribución utilizando superficies de respuesta. *Lasallistas de Investigación* 9(1), 70-85.
- [59] Dess, G., Lumpkin G. & Eisner, A. (2011). *Administración Estratégica, textos y casos*. McGraw Hill.

# Prácticas de referencia para la transferencia de conocimiento en instituciones de educación superior: Una Revisión Sistemática de Literatura

Carlos Guerra C.<sup>1</sup>

María Orjuela S.<sup>2</sup>

Lizeth Serrano C.<sup>3</sup>

Universidad Católica de Colombia  
Bogotá – Colombia

Este capítulo, tiene como objetivo identificar y analizar prácticas de referencia para la transferencia de conocimiento en el contexto nacional e internacional. Con este propósito, se realizó una revisión sistemática de literatura y un análisis de tendencias sobre el tópico utilizando el software de minería de datos VantagePoint®. Los resultados obtenidos evidencian que el estudio del tema es de interés creciente para la comunidad académica y que se incrementado su integración en la estrategia de innovación y apropiación social de conocimiento de las instituciones de educación superior. Igualmente, se hizo evidente que el fortalecimiento de las relaciones de confianza entre la academia, la empresa y el estado se constituye en un determinante para incrementar el impacto del proceso de transferencia de conocimiento en la sociedad, logrando que este se traduzca en el desarrollo de nuevo productos, servicios y soluciones que incrementen la competitividad de los ecosistemas de innovación en las regiones.

## 1. INTRODUCCIÓN

La revisión de literatura es la forma de demostrar evidencia de la información y la práctica de cualquier disciplina, siendo un objeto clave para las comunidades académicas [1], el objeto de realizar una revisión de literatura suele permitir que los investigadores puedan diagramar y evaluar el espacio intelectual que existe y lograr especificar una pregunta de investigación para desarrollar aún más el conocimiento existente [1], la revisión sistemática difiere de la revisión narrativa siendo estas dos subcampos de la revisión de literatura, adaptando un proceso científico que es replicable y transparente buscando en estudios tratando de minimizar el sesgo que se pueda presentar [2], en este artículo se usa la metodología de la revisión sistemática, con el fin de lograr encontrar prácticas que las Universidades e Instituciones Educativas utilizan para lograr la transferencia de conocimiento, además de identificar los retos evidenciados de este proceso. Con este objetivo, se analizaron documentos derivados de las bases de datos ScienceDirect y EBSCO en un proceso de análisis de contenido que integró el software MaxQDA®, este ejercicio se complementó con un análisis de tendencias utilizando el software especializado VantagePoint®.

La transferencia de conocimiento se entiende como un proceso a través del cual los resultados de la investigación, desarrollo tecnológico y de innovación son transferidos a la industria para garantizar su aplicación en un mercado. En Estados Unidos, este proceso se impulsó mediante la ley Bayh-dole, permitiendo promover la colaboración Universidad-Industria, a través del desarrollo de actividades de I+D y de procesos de difusión de innovación donde se cerraron brechas de capacidades entre los dos actores [3], debido a esta ley, en el Reino Unido, Europa y Latinoamérica, se adoptó una visión de difundir la transferencia de conocimiento de las Universidades a las organizaciones. Algunas de las universidades destacadas por adoptar este enfoque son el MIT, la Universidad de Stanford, la Universidad estatal de Arizona y la Universidad de Arkansas, la Universidad de Cambridge, en malasia la UTM, en Alemania la Universidad de Bielefeld, asimismo en Latinoamérica se destacan como países líderes en esta temática: Chile, México, Argentina, Brasil, Costa Rica y Colombia [4] que poseen entidades encargadas de dinamizar los procesos de transferencia de conocimiento.

Específicamente en Colombia por medio de la Ley 1286 de 2009, que modificó la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en Departamento Administrativo, con el propósito de fortalecer el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en el país, esta ley que permitió la estructuración Colciencias, facilitó la integración de actividades científicas, tecnológicas y de innovación bajo una lógica donde empresas, Estado y academia interactúan en función de los retos del país [5]. En esta dinámica Colciencias, impulsó la creación de Oficinas de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI), también conocidas como Oficinas de Transferencia de Conocimiento (OCT) en la academia con el propósito de ofertar servicios de valoración de tecnologías, capacidades para el desarrollo de invenciones, facilitar el desarrollo de procesos de protección intelectual, realiza divulgación y comunicación de beneficios del desarrollo de nuevas tecnologías y finalmente, crear las conexiones necesarias para realizar procesos de transferencia de conocimiento con impacto real en la sociedad.

Considerando la relevancia de este tema, en esta investigación se analizaron tendencias en el estudio de la Transferencia de conocimiento y la identificación de prácticas de referencia que pueden contribuir a las Instituciones de Educación Superior en el proceso de integración de esta temática en su estrategia de innovación.

---

<sup>1</sup> [ceguerra75@ucatolica.edu.co](mailto:ceguerra75@ucatolica.edu.co)

<sup>2</sup> [morjuela09@ucatolica.edu.co](mailto:morjuela09@ucatolica.edu.co)

<sup>3</sup> [lfserranoc@ucatolica.edu.co](mailto:lfserranoc@ucatolica.edu.co)

## 2. MÉTODO

La revisión sistemática, es un “estudio integrativo, observacional, retrospectivo, secundario, en el cual se combinan estudios que examinan la misma pregunta” [6]; Al respecto, Glas, define dos formas de realizar una revisión sistemática; cuantitativa y cualitativa, su definición de “un análisis estadístico de una amplia serie de análisis de resultados de estudios individuales con el objeto de integrar sus hallazgos [7]. Jesson replica de forma similar a Beltrán, y define la revisión sistemática como “un método de investigación en sí mismo que deriva sus resultados de los datos ya descritos en la literatura publicada.” [8]. La metodología de la revisión sistemática, según Kitchenham; sigue una serie de etapas: planeación, desarrollo de la revisión y publicación de los resultados [9]. A continuación, se detalla cada una de las fases abordadas en este estudio.

### 2.1 Planeación

En esta etapa se definió un protocolo de búsqueda para realizar la revisión sistemática. Se definieron como palabras claves, transferencia de conocimiento, transferencia de tecnología, oficinas de transferencia de conocimiento, oficinas de transferencia de tecnología, estrategias de transferencia de conocimiento y tecnología. De acuerdo con las palabras claves, se construyó la ecuación de búsqueda (“*Knowledge Transfer*” AND “*Technology Transfer*”) y se aplicó en las bases de datos de ScienceDirect y EBSCO.

### 2.2 Desarrollo de la revisión

En esta etapa se establecieron los criterios de inclusión; en este caso, se estableció que los artículos analizados deberían contener información explícita sobre procesos de transferencia de conocimiento implementados en la práctica. Para evidenciar este criterio de inclusión en los documentos, se analizaron de forma secuencial los apartados título, resumen y palabras clave siguiendo el proceso mostrado en la Figura 1.

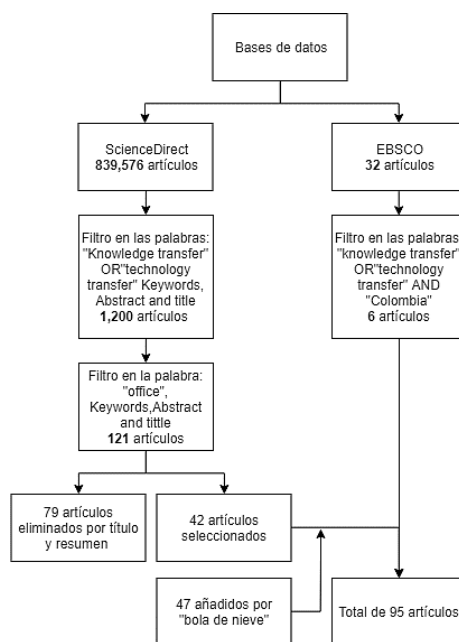


Figura 1. Diagrama de flujo para la aplicación de filtros de búsqueda en las bases de datos

### 2.3 Publicación de los resultados

En el proceso de análisis de contenido de los 95 artículos resultantes del proceso de filtrado, se utilizó el software de análisis cualitativo MAXQDA, que permitió codificar los resultados del proceso de revisión en categorías analíticas que facilitaron la estructuración de los resultados que se presentan en este estudio.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Conceptualización: Transferencia de Conocimiento

Se evidencia que existen convergencias en las definiciones de transferencia de conocimiento planteadas por los autores revisados (Ver Tabla 1), en donde se menciona que es un proceso que se desarrolla a través de actividades validadas por experiencias [10-14] que permiten afianzar relaciones entre la academia y el sector empresarial [10-12, 14], relaciones que se fundamentan en algunos casos en contratos de investigación, estudios conjuntos o manuales y documentos que formalizan este proceso [11-14]. El ejercicio de revisión permitió la construcción de un entendimiento del concepto de Transferencia de Conocimiento como: un conjunto de actividades que posibilitan compartir las ideas, experiencias y resultados de investigación en doble vía entre la academia y el sector productivo y social en donde se puede lograr como resultado la generación de un beneficio económico y social entre los actores que integran este proceso, actores que usualmente son las Universidades, las industrias y el Estado.

**Tabla 1.** Conceptualización de transferencia de conocimiento desde algunos de los autores revisados

Concepto
Es el conjunto de actividades dirigidas a la difusión de conocimientos experiencias y habilidades, posibilitando su explotación por instituciones de I+D, el sector productivo y social [10].
Son las actividades destinadas a trasladar el conocimiento, propiedad intelectual y habilidades de las universidades a las empresas, por medio de los contratos de investigación, licencias, investigadores que pasan períodos en la empresa que trabaja con los investigadores de las universidades [11]
Es la difusión de una tecnología o producto desde su invención original a un contexto económico y social distinto [12]
Es la transmisión de las ideas de las personas por medio de procesos de socialización, codificado mediante manuales, documentos, bases de datos, en donde puede ser almacenado, usado y reutilizado como un proceso que involucra aspectos cognitivos [13]
el proceso mediante el cual el conocimiento, la experticia y los activos intelectuales de las universidades son aplicados constructivamente más allá de sus límites para el beneficio de la economía y la sociedad, mediante acuerdos de doble vía con la industria, el Estado y las comunidades [14]

### 3.2 Prácticas de referencia para la Transferencia de Conocimiento

La educación superior ha mostrado el interés por ejecutar cooperación en materia de investigación en un ámbito internacional [15], por esta razón es primordial que, a través de los cuerpos académicos de la Universidad, sus investigadores y estudiantes, se contribuya a fortalecer la generación de conocimiento para la solución de problemas de la sociedad [16].

En los procesos de transferencia de conocimiento se hace primordial la constitución de una forma de compartir y codificar las ideas y las invenciones de los investigadores y actores académicos de una manera institucional, para que sea posible interactuar con la industria y la sociedad. Igualmente, se evidencia la importancia de la definición de la transferencia en cada una de las instituciones que quieran abordar este proceso, sin la definición de un lenguaje común en es complejo que se desarrollen este tipo de procesos [17]. Se encuentra que las Instituciones de Educación Superior han buscado la forma de transferir el conocimiento generado en la Universidad por medio de diferentes entidades, una de éstas son la Oficinas de Transferencia de conocimiento, que usualmente tienen como objetivo, identificar las necesidades de la Industria, con el fin de comercializar los resultados de las investigación realizados por la Universidad y promover el desarrollo tecnológico, con el propósito de potencializar los desarrollos institucionales en alineación permanente con los retos de país.

Se encontró que las Instituciones de Educación Superior que han implementado este tipo de procesos, tienen un compromiso permanente con su misión de extensión y proyección social donde desarrollan acciones para el fomentar el emprendimiento y la innovación [18, 19], asimismo estas instituciones han desarrollado esfuerzos por lograr la integración de políticas de transferencia de conocimiento con políticas de formación científica [20], por esta razón las Universidades han tomado la iniciativa de participar en procesos de transferencia de conocimiento, y vinculación con el sector industrial, a través de procesos formales como contratos de tecnología e investigación conjunta [21, 22] y acuerdos de licencia[23-25].

La Transferencia de Conocimiento, ayuda a las Universidades a tener un acercamiento directo con el sector productivo y el Estado, facilitando la gestión de canales de comunicación y divulgación de sus resultados de investigación [26, 27]. En la búsqueda de fortalecer estos canales de comunicación, algunas universidades han desarrollado iniciativas fundamentadas en programas de capacitación y consultoría para las empresas en temas de modelos de negocio y desarrollo de nuevas tecnologías, espacios de formación que permiten la interacción y el afianzamiento de las relaciones confianza entre actores [28, 29].

Se encontró que, para desarrollar iniciativas de transferencia, es fundamental que las Universidades generen esfuerzos por potencializar la cultura emprendedora, donde se consolide una dinámica de innovación que permita la formación de nuevos modelos de negocio y la creación de empresas de base tecnológica [30, 31]. En este ejercicio es relevante acercar los procesos investigativos a los retos del sector productivo, para ello, se encontró que las Instituciones de Educación Superior que han adelantado estos procesos cuentan con capital semilla para la construcción de prototipos de los resultados de investigación que permiten acercar los lenguajes y establecer con claridad los resultados del estudio y las limitaciones en los alcances [32], aspectos esenciales para desarrollar procesos de negociación fundamentados en la confianza.

Igualmente, se hizo evidente que las Universidades, antes de pensar en estructurar una Oficina de Transferencia de Conocimiento, deben realizar un análisis interno que permita evaluar sus procesos, procedimientos y lineamientos en relación con su capacidad de ser ágiles antes procesos de interacción y negociación con el sector externo [33], lo anterior, dado que la academia usualmente presenta tiempos de entrega superiores a los demandados por la industria. Se evidenció como práctica la necesidad de las instituciones de educación superior de contar con plataformas de interacción dinámicas que permitan identificar en tiempo real sus flujos de conocimiento, las investigaciones en curso y las ya realizadas, lo anterior, dado que las oportunidades de negociación con la industria pueden estar condicionadas por este reconocimiento de capacidades internas de la institución [34].

Adicional, se identificó como práctica la creación de clubs virtuales que permitan facilitar el acceso a los resultados de investigación realizados en la Universidad generando nuevos vínculos tanto entre investigadores como con el

sector empresarial [35-37]. Es fundamental que las Universidades cuente con equipos facilitadores formados en temas de transferencia de conocimiento y negociación de tecnología que se encarguen de dinamizar los procesos de promoción, transferencia y comercialización de los resultados de investigación desarrollados en las Instituciones de Educación Superior. En resumen, de acuerdo con la revisión sistemática realizada, se destacan diez prácticas de referencia para desarrollar procesos de transferencia de conocimiento por parte de las instituciones:

1. Dinamizar la cultura emprendedora en la Universidad.
2. Establecer planes estratégicos de transferencia de conocimiento articulados con la misión institucional y desarrollarlos a través de planes operativos y tácticos.
3. Definir políticas de transferencia de conocimiento que partan del entendimiento del concepto para la comunidad académica.
4. Definir contratos y clausuras de transferencia de conocimiento y tecnología en etapas tempranas.
5. Estructurar acuerdos de licencia de la propiedad intelectual
6. Contar con plataformas dinámicas que permitan identificar los flujos de conocimiento.
7. Disponer de fondos monetarios para financiar iniciativas de innovación.
8. Contar con espacios que promuevan la interacción entre actores de la comunidad académica.
9. Identificar estrategias para transformar procesos investigativos en iniciativas de consultoría que pueden traducirse en estudios conjuntos industria-academia.
10. Disponer de grupos facilitadores encargados de hacer de la transferencia de conocimiento una dinámica de innovación permanente.

Sin embargo, a pesar del esfuerzo e interés de las Universidades por realizar procesos de Transferencia de conocimiento, desde el punto de vista de Bernegal, las Instituciones de Educación Superior presentan dificultades en la capacidad de financiar los resultados de las investigaciones, la creación de nuevos modelos de negocio, la generación de una cultura emprendedora que se sostenga en el tiempo; además de las múltiples divergencias en términos de lenguajes, dinámicas y visiones entre la Universidad y la Industria [3], expresado en términos de Siegel, las Universidades, tienen como objetivo desarrollar tecnología, productos y servicios, con la finalidad de capitalizar y materializar los resultados de las investigaciones, mientras que las empresas buscan obtener licencias exclusivas de los resultados de las investigaciones desarrolladas [37].

### 3.3 Análisis de Tendencias

Referente a la ecuación de búsqueda, utilizada para la revisión sistemática, se realizó un análisis de tendencias utilizando el Software VantagePoint® y empleando la ecuación de búsqueda (Search results: 95 results found for TITLE-ABSTR-KEY ("knowledge transfer" OR "technology transfer") and TITLE-ABSTR-KEY (office)). Para este propósito, se analizaron los siguientes factores: relaciones entre palabras clave, tendencias en el estudio del tema y análisis de la dinámica de publicación por año.

- *Relaciones entre palabras clave.* Respecto a la ecuación de búsqueda se obtuvo como resultado en términos de las relaciones de las palabras claves identificadas en los artículos, las categorías principales (Ver Figura 1): Transferencia de Tecnología en las Universidades (31 artículos), Oficinas de Transferencias de Tecnología(23 artículos), Oficinas de Transferencia de Conocimiento (14 artículos),Patentes (12 Artículos), Universidad-Industria y Transferencia Tecnológica (11 artículos), Academias emprendedoras(10 artículos), Estrategias de licencia (10 artículos), Comercialización (9 artículos), Universidad (artículos), Innovación (8 artículos), Universidad-Spin off (8 artículos), Universidad-Industria (8 artículos), Redes( 7 artículos), Propiedad Intelectual (7 artículos), determinando el estudio de estas categorías como elemento fundamental al abordar el diseño de estrategias de Transferencia de Conocimiento en las Instituciones de Educación Superior.
- *Tendencias en el Estudio del Tema.* De acuerdo con los resultados arrojados por el software VantagePoint®, se identificaron las palabras clave con mayor relevancia para el tema de estudio, seleccionando como tendencia solo aquellas palabras que tuvieran más de cuatro artículos que la integraran como su tema de análisis principal (Ver Figura 2). Y a continuación se presenta en síntesis el análisis de cada una estas tendencias.
- *Transferencia de tecnología universitaria.* El aumento de los esfuerzos de socialización de las mejores prácticas para lograr la transferencia de tecnología es un indicador importante para las partes interesadas. Donde se mencionan seis fases del proceso de compartir las mejores prácticas: la primera fase, la fase de búsqueda, es aquella en la cual las prácticas necesitan ser identificadas, para saber cuáles pueden ser compartidas; en la segunda fase, la evaluación, las mejores prácticas necesitan ser contextualizadas al grupo de personas que involucran; en la tercera fase, la validación, la calidad de cada practica es analizada en una profundidad mayor, relacionada con el impacto que se crea beneficioso; la implementación es la cuarta fase, en la cual se adoptan y adaptan las prácticas seleccionadas, razón por la cual es la fase que presenta un mayor reto, pues se debe adaptar la práctica a un entorno posiblemente complejo. Las últimas fases son la de revisión y rutina; en la primera, se determina si la implementación de las mejores prácticas ha logrado reducir o cerrar la fisura del desempeño, y en la segunda, el objetivo es el trabajo estandarizado de las prácticas identificadas, todo para poder alcanzar procesos de transferencia eficientes y con impacto positivo en el medio donde se desarrollan [38].

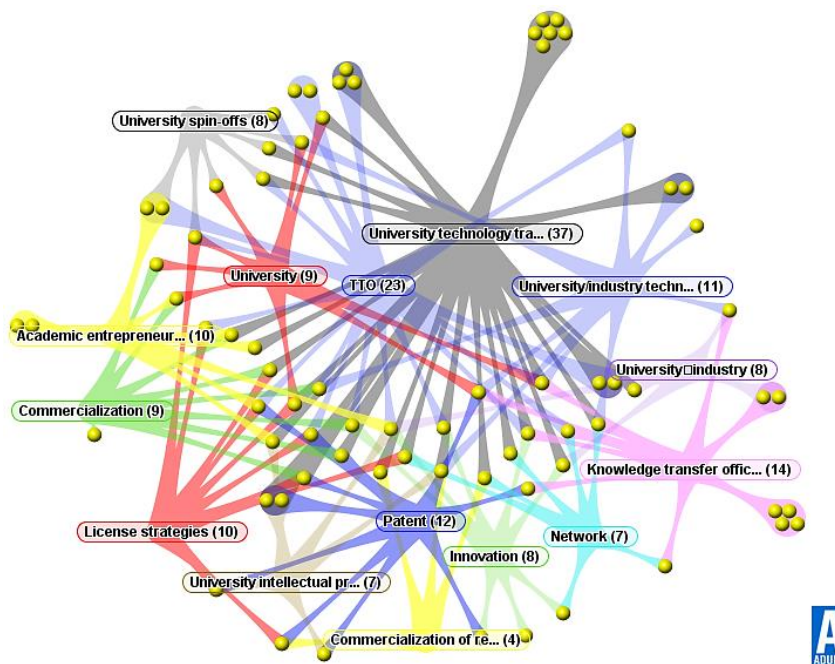
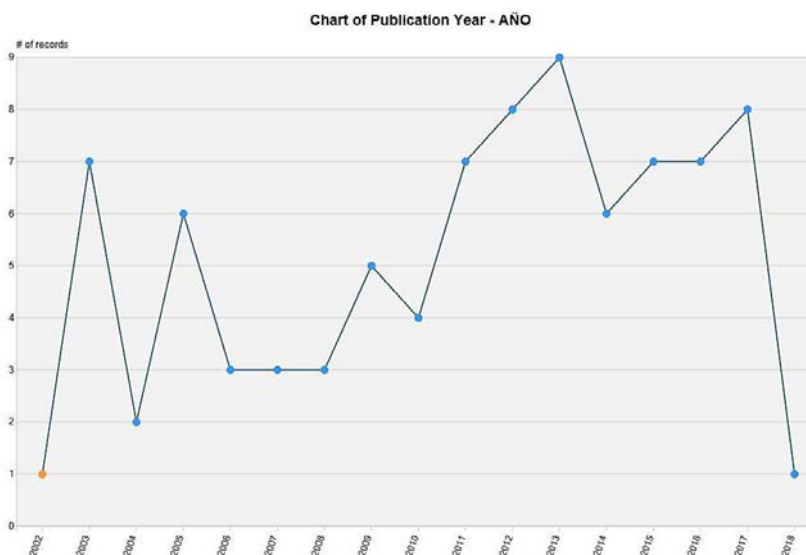


Figura 2. Mapa de relación sobre las tendencias Investigativas asociadas al tema

- *Oficinas de transferencia de tecnología (TTO).* Las oficinas de transferencia de tecnología, son un organismo que permite vincular a las universidades con las empresas [39], esta vinculación brinda una oportunidad para apoyar y explotar los resultados de las investigaciones y lograr que las organizaciones desarrollen nuevos productos y servicios que permiten mantener un ventaja competitiva con el resto de las empresas[40]; las universidades buscan cada vez ser más emprendedoras; por ello, estructuran oficinas de transferencia para diseñar estrategias que les permitan comercializar los resultados de investigación. Entre estas estrategias se encuentran el desarrollo de licencias, patentes y derechos de propiedad intelectual, que generan indicadores de productividad e ingresos para la universidad [41]. Las oficinas de transferencia son entes reguladores y de apoyo para lograr la comercialización de las investigaciones, y a su fomentan el desarrollo de empresas universitarias, conocidas como Spin-off, lo que permite que las universidades sean competitivas y creen nuevos mercados [42].
- *Relación Universidad- Industria.* La sociedad afirma que la universidad debe ser una fuerza para fomentar el desarrollo económico y social. La respuesta de la Universidad ha sido un aumento en la difusión del conocimiento científico y actividades de transferencia de tecnología. Sin embargo, hay diferencias en la capacidad de las universidades para contribuir a esta "nueva" misión [43]. La ley Bayh-dole, en Estados Unidos, permitió promover las actividades de I+D, con el fin de explotar los resultados de investigación y regular la propiedad intelectual. Esto condujo a mejorar los incentivos de las universidades y empresas, desarrollando y comercializando tecnología basada en la universidad; además promovió la relación entre la industria y la universidad; debido a esta ley, varios países empezaron a promover la transferencia de conocimiento y tecnología. Esta visión se expandió por Europa y Reino Unido hasta llegar a Latinoamérica [44].
- *Academias Emprendedoras.* En la última década, la tecnología ha estado en constante evolución; por lo tanto, las Universidades han buscado diferentes mecanismos para adaptarse a este cambio. La academia busca generar conocimiento, pero a la vez desarrollo económico; por esta razón, han incrementado su énfasis en el impulso de iniciativas de emprendimiento tecnológico [45]. Con este propósito han desarrollado mecanismos de colaboración entre los actores de los ecosistemas de innovación, motivando a los estudiantes, académicos e investigadores a desarrollar investigación que permita desarrollar nuevas tecnologías, productos y servicios, con el fin de generar valor a través de nuevas estrategias orientadas al desarrollo de licencias y patentes [46, 47].
- *Comercialización de la investigación.* La capacidad de buscar invenciones comercializables de forma proactiva es importante porque cuanto antes se pueda informar a la Oficina de Transferencia de Conocimiento de una posible oportunidad de comercialización, más tiempo esta tendrá para evaluar la invención y desarrollar un plan de explotación. La búsqueda proactiva por parte de las Oficinas a veces se considera controvertida, porque puede influir en las elecciones de investigación, por ejemplo, cambiando los esfuerzos de la investigación básica a la aplicada. Dentro de cada Oficina de Transferencia se deberá definir el enfoque y la visión que se implementará para fomentar tanto el reconocimiento de las invenciones como sus mecanismos de explotación [48]. La Oficina de Transferencia deberá desarrollar capacidades en relación con la evaluación de tecnología, dado que se hace necesario para determinar cuáles resultados de investigación están lo suficientemente desarrollados para ser traducidos a procesos de explotación industrial [49].



- *Comercialización.* Las universidades desarrollan de forma permanente procesos investigativos orientados al desarrollo de nuevas tecnologías e innovaciones; la comercialización se centra en convertir estos resultados en elementos susceptibles a ser vendidos o a ser licenciados sus derechos de propiedad intelectual [50]. Sin embargo, en este ejercicio de negociación cada vez se hace más frecuente la vinculación entre las empresas y las universidades para la generación de ingresos compartidos y la distribución de los costos asociados a los riesgos de desarrollo de las tecnologías [51, 52].
- *Patentes y estrategias de licencia.* Las instituciones de educación superior están cada vez más interesadas en la comercialización de los resultados de las investigaciones; es por ello que han adoptado diferentes estrategias. Una de ellas es la protección de la invención a través de patentes, con el fin de obtener beneficios monetarios a través del licenciamiento de la patente [53, 54], uno de los intermediarios para lograr el licenciamiento de la patente son las OTT; de este modo, las universidades están en constante búsqueda de estrategias para comercializar sus investigaciones y lograr obtener un lucro de estas a través de las empresas [55, 56].
- *Spin off en la Universidad.* La literatura sobre la actividad derivada de la universidad se ha ampliado rápidamente en los últimos años. La creación de spin-off académicas es un fenómeno multidimensional, condicionado por un amplio rango de factores institucionales, sociales y legales [57]. Pazos cita a Gómez, Mira, Verdú y Sancho, quienes sugieren que la literatura existente sobre este tema se puede categorizar en seis flujos separados: cuatro de ellos estudian los determinantes de la actividad de spin-off dentro de un contexto universitario y los dos grupos de investigación restantes se centran en las consecuencias de la actividad de spin-off. Desde esta perspectiva [58] la tendencia de una invención de ser explotada a través de la creación depende de los atributos del régimen tecnológico en el que se encuentra. Por ejemplo, la edad del campo técnico, la tendencia del mercado hacia la segmentación, la efectividad de las patentes, y la importancia de complementar los activos en mercadeo y distribución, son precondiciones favorables del mercado para que la transferencia de tecnología se realice con éxito. Como resultado, algunas disciplinas científicas pueden mostrar una mayor tendencia a generar empresas spin-off [59].
- *Innovación.* La relación universidad-empresa ha venido evolucionando y adoptando diferentes prácticas de asociación. La vinculación universidad-empresa ha logrado generar transferencia de conocimiento, emprendimiento y desarrollo económico, permitiendo que la universidad sea un organismo de innovación [60]. La inversión en procesos de I+D+i ha permitido crear parques científicos y tecnológicos, donde la innovación es la principal herramienta para contribuir a la productividad empresarial y nacional [61].
- *Publicaciones por año.* Respecto a los 95 artículos analizados por el Software VantagePoint®, se encontró que la dinámica de publicación por año sobre el tema de Transferencia de Conocimiento presenta una tendencia creciente según se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Publicación por año Transferencia de Conocimiento

La Figura 3, indica que durante el periodo del 2002 al 2008, las publicaciones respecto al tema de transferencia de conocimiento y tecnologías corresponden a un 29% de toda la literatura referente al tema. También se observa un tendencia creciente y decreciente en este periodo, mientras que en del 2009 al 2013 se ha realizado el 71% de las publicaciones; además, del 2009 al 2013 se evidencia una tendencia creciente, siendo el 2013 el año en el cual se hacen 9 publicaciones, realizando un gran aporte a la literatura. El campo de estudio de las oficinas de transferencia de conocimiento y tecnología se ha convertido en una tendencia en los últimos años debido a al interés de las universidades y las empresas de aprovechar los resultados de las investigaciones, con el objetivo de llevar a cabo su comercialización; por esta razón, se concluye sobre el crecimiento de la literatura sobre este tema.

#### 4. CONCLUSIONES

Las Universidades actualmente tienen como prioridad estar a la vanguardia en los temas de innovación, tecnología y emprendimiento, por esta razón han desarrollado estrategias de innovación fundamentadas en procesos de Transferencia de Conocimiento que implican alinear sus iniciativas investigativas con los retos reales de la sociedad. A pesar de la relevancia del tópico, en el proceso de revisión se encontraron retos tanto en el proceso de generar definiciones de Transferencia de Conocimiento desde una perspectiva contextualizada a las capacidades institucionales, como retos relacionados con el afianzar relaciones de confianza entre industria y academia, dado que estas relaciones presentan rupturas explicadas por las múltiples brechas en términos de lenguajes, resultados esperados y dinámica de respuesta a situaciones que demandan soluciones prácticas y a la vez disruptivas.

Igualmente, se hizo evidente la necesidad que las Instituciones de Educación superior interesadas en el desarrollo de procesos de transferencia fortalezcan su dinámica investigativa desde la colaboración entre los mismos actores de su comunidad académica y el reconocimiento de sus fortalezas, retos y capacidades para el desarrollo de procesos investigativos con el potencial de transformarse en soluciones de innovación. Lo anterior, evidenciado en las limitaciones que presentan las instituciones en términos de habilidades de negociación, capacidad de financiación de productos y modelos y la dificultad de generar una cultura emprendedora sostenida en el largo plazo que soporte los procesos de interacción con problemáticas reales.

En síntesis, se espera que, desde la perspectiva estratégica, las prácticas identificadas en esta investigación sirvan de referente para las Universidades interesadas en desarrollar procesos de transferencia de conocimiento, dado que se presenta una síntesis de las acciones abordadas por instituciones que han desarrollado en la práctica este tipo de procesos. Finalmente, desde la perspectiva académica se espera que este estudio sea referente para que futuras investigaciones profundicen en abordar los retos antes mencionados y el estudio de temáticas investigativas emergentes relacionadas con el tema de transferencia de conocimiento y que fueron analizadas en el estudio de tendencias integrado en esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Tranfield, D., Denyer, D. & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed management Knowledge by Means of Systematic Review. *Br. J. Manag.* 14(3), 207-222.
- [2] Cook, D., Mulrow, C. & Haynes, R. (1997). Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions. *Annals of Internal Medicine* 126 (5), 376-380.
- [3] Berbegal, J., La Fuente, E. & Francesc, S. (2013). The pursuit of knowledge transfer activities: An efficiency analysis of Spanish universities. *Journal of Business Research* 66(10), 2051-2059.
- [4] Calderón, G. & García, J. (2013). Knowledge transfer and university patents in Mexico. *Academia Revista Latinoamericana de Administración* 26 (1), 33-60.
- [5] Ley 1286 (2009). Por la cual se modifica la ley 29 de 1990. Bogotá.
- [6] Beltrán, O. (2005). Revisiones sistemáticas de la literatura. *Rev Col Gastroenterol* 20(1), 60-69.
- [7] Glass, G. (1976). Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational researcher* 5(10), 3-8.
- [8] Jesson, J. & Lacey, F. (2006). How to do (or not to do) a critical literature review. *Pharmacy Education* 6, 139-148.
- [9] Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele University.
- [10] Rubiralta, M. & Bellavista, J. (2003). Nuevos mecanismos de transferencia de tecnología: Debilidades y oportunidades del sistema español de transferencia de tecnología. En *Encuentros Empresariales Cotec*.
- [11] Bayona, C. & González, R. (2010). La transferencia de conocimiento en la Universidad Pública de Navarra: Una visión desde la empresa y desde el ámbito universitario. *Universidad Pública de Navarra*.
- [12] Becerra, M. (2004). La transferencia de tecnología en Japón: conceptos y enfoques. *Universidad Autónoma de Nuevo León*.
- [13] Albino, V., Garavelli, A. & Gorgoglione, M. (2004). Organization and technology in knowledge transfer. *Benchmarking: An International Journal* 11(6), 584-600.
- [14] Holli, M., Wickramasinghe, R. & Van Leeuwen, M. (2008). Metrics for the evaluation of knowledge transfer activities at universities. *Library House*.
- [15] Gacel, J. (2000). La dimensión internacional de las universidades mexicanas. *Rev. Edu. Sup. y Socie.* 11(1), 121-142.
- [16] Amador, E. & Castro, J. (2013). Office of Technology Transfer at the University as a strategy to promote innovation and competitiveness. Case: Hidalgo State, México. *Oficinas de Transferencia Tecnológica en las Universidades como Estrategia para Fomentar la Innovación y la Competitividad*.
- [17] Hülsbeck, M., Lehmann, E. & Starnecker, A. (2013). Performance of technology transfer offices in Germany. *The journal of technology transfer* 38(3), 199-215.
- [18] Howells, J. (2006). Intermediation and the role of intermediaries in innovation. *Research policy* 35(5), 715-728.
- [19] Etzkowitz, H. & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university-industry-government relations. *Research policy* 29(2), 109-123.
- [20] Wu, Y., Welch, E. & Huang, W. (2015). Commercialization of university inventions: Individual and institutional factors affecting licensing of university patents. *Technovation* 36, 12-25.
- [21] Khademi, T. et al. (2015). The Role of Potential Licensee Availability in Facilitating Commercialization of Academic Research Results. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 172, 331-335.
- [22] Manderieux, L. (2011). Guía práctica para la creación y la gestión de oficinas de transferencia de tecnología en universidades y centros de investigación de América Latina UNE 166006. *Asociación Española de Normalización y Certificación*.
- [23] Conti, A. & Gaule, P. (2011). Is the US outperforming Europe in university technology licensing? A new perspective on the European Paradox. *Research Policy* 40(1), 123-135.
- [24] Siegel, D. et al. (2004). Toward a model of the effective transfer of scientific knowledge from academicians to practitioners: qualitative evidence from the commercialization of university technologies. *Journal of engineering and technology management* 21(1-2), 115-142.
- [25] Blumenberg, S., Wagner, H. & Beimborn, D. (2009). Knowledge transfer processes in IT outsourcing relationships and their impact on shared knowledge and outsourcing performance. *Int. Journal of Information Management* 29(5), 342-352.
- [26] Calderón, M. & García, J. (2013). Knowledge transfer and university patents in Mexico. *Academia Revista Latinoamericana de Administración* 26(1), 33-60.
- [27] Göktepe, D. (2005). Investigation of university industry technology transfer cases: a conceptual and methodological approach. Danish Research Unit for Industrial Dynamics. Project at University Lund.
- [28] Rincón, A. & Valencia, M. (2015). Identificación de los factores que influyen en el proceso de transferencia de resultados de investigación en cinco universidades de Santiago de Cali y su contribución al sistema productivo. Trabajo de grado. *Universidad de San Buenaventura Cali*.
- [29] Grimpe, C. & Fier, H. (2010). Informal university technology transfer: a comparison between the United States and Germany. *The Journal of Technology Transfer* 35(6), 637-650.
- [30] Siegel, D. & Phan, P. (2005). Analyzing the effectiveness of university technology transfer: implications for entrepreneurship education. Emerald Group Publishing Limited.
- [31] Bathelt, H. et al. (2010). A knowledge-based typology of university spin-offs in the context of regional economic development. *Technovation* 30(9), 519-532.
- [32] Tognato, C. (2005). Comercializar la tecnología generada desde las universidades: un reto institucional. *Revista de Ingeniería* 21, 30-39.
- [33] Wright, M., Birley, S. & Mosey, S. (2004). Entrepreneurship and university technology transfer. *The Journal of Technology Transfer* 29(3-4), 235-246.
- [34] Battaglia, D., Landoni, P. & Rizzitelli, F. (2017). Organizational structures for external growth of University Technology Transfer Offices: An explorative analysis. *Technological Forecasting and Social Change* 123, 45-56.
- [35] Weckowska, D. (2015). Learning in university technology transfer offices: transactions-focused and relations-focused approaches to commercialization of academic research. *Technovation* 41, 62-74.
- [36] Bradley, S., Hayter, C. & Link, A. (2013). Models and methods of university technology transfer. *Foundations and Trends in Entrepreneurship* 9(6), 571-650.

- [37] Siegel, D., Waldman, D. & Link, A. (2003). Assessing the impact of organizational practices on the relative productivity of university technology transfer offices: an exploratory study. *Research policy* 32(1), 27-48.
- [38] Jarrar, Y. & Zairi, M. (2000). Best practice transfers for future competitiveness: a study of best practices. *Total Quality Management* 11(4-6), 734-740.
- [39] Siegel, D. et al. (2004). Toward a model of the effective transfer of scientific knowledge from academicians to practitioners: qualitative evidence from the commercialization of university technologies. *Journal of engineering and technology management* 21(1-2), 115-142.
- [40] Bell, E. (1993). Some current issues in technology transfer and academic-industrial relations: a review: Practitioners' forum. *Technology Analysis & Strategic Management* 5(3), 307-322.
- [41] Rothaermel, F., Agung, S. & Jiang, L. (2007). University entrepreneurship: a taxonomy of the literature. *Industrial and corporate change* 16(4), 691-791.
- [42] Herrero, F. & Ángel, P. (2008). OTRI: Agenda de investigación. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 14(3), 67-78.
- [43] Pazos, D. et al. (2012). A resource-based view of university spin-off activity: New evidence from the Spanish case. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa* 21(3), 255-265.
- [44] Popp, E. (2008). Why did universities start patenting? Institution-building and the road to the Bayh-Dole Act. *Social studies of science* 38(6), 835-871.
- [45] Grimaldi, R. et al. (2011). 30 years after Bayh-Dole: Reassessing academic entrepreneurship. *Research Policy* 40(8), 1045-1057.
- [46] Stal, E. & Fujino, A. (2016). The evolution of universities' relations with the business sector in Brazil: What national publications between 1980 and 2012 reveal. *Revista de Administração* 51(1), 72-86.
- [47] Geuna, A. & Rossi, F. (2011). Changes to university IPR regulations in Europe and the impact on academic patenting. *Research Policy* 40(8), 1068-1076.
- [48] Weckowska, D. (2015). Learning in university technology transfer offices: transactions-focused and relations-focused approaches to commercialization of academic research. *Technovation* 41, 62-74.
- [49] Ndonzau, F., Pirnay, F. & Surlemont, B. (2002). A stage model of academic spin-off creation. *Technovation*, 22(5), 281-289.
- [50] Weckowska, M. (2015). Learning in university technology transfer offices: transactions-focused and relations-focused approaches to commercialization of academic research. *Technovation* 41, p. 62-74.
- [51] Miller, F., Sanders, C. & Lehoux, P. (2009). Imagining value, imagining users: academic technology transfers for health innovation. *Social Science & Medicine* 68(8), 1481-1488.
- [52] Aldridge, T. & Audretsch, D. (2010). Does policy influence the commercialization route? Evidence from National Institutes of Health funded scientists. *Research Policy* 39(5), 583-588.
- [53] Bradley, S., Hayter, C. & Link, A. (2013). Models and methods of university technology transfer. *Foundations and Trends in Entrepreneurship* 9(6), 571-650.
- [54] Markman, G. et al. (2005). Entrepreneurship and university-based technology transfer. *Journal of business venturing* 20(2), 241-263.
- [55] Bekkers, R. et al. (2006). Determining Factors of the Effectiveness of IP-based Spin-offs: Comparing the Netherlands and the US. *The Journal of Technology Transfer* 31(5), 545-546.
- [56] Alexander, A. & Martin, D. (2013). Intermediaries for open innovation: A competence-based comparison of knowledge transfer offices practices. *Technological Forecasting and Social Change* 80(1), 38-49.
- [57] Caldera, A. & Debande, O. (2010). Performance of Spanish universities in technology transfer: An empirical analysis. *Research Policy* 39(9), 1160-1173.
- [58] Pazos, D. et al. (2012). A resource-based view of university spin-off activity: New evidence from the Spanish case. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa* 21(3), 255-265.
- [59] Di Gregorio, D. & Shane, S. (2003). Why do some universities generate more start-ups than others? *Research policy* 32(2), 209-227.
- [60] Freitas, I., Geuna, A. & Rossi, F. (2013). Finding the right partners: Institutional and personal modes of governance of university-industry interactions. *Research Policy* 42(1), 50-62.
- [61] Serrano, G. (2011). Nuevos enfoques para la gestión estratégica de la I+D e innovación en las universidades New approaches for the strategic management of R&D and innovation in universities. *Revista de educación* 355, 83-108.

# Directriz de mejoramiento del proceso de envasado en la Industria Licorera del Cauca basado en el Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Nora F. Arciniegas S.<sup>1</sup>

Juan M. Segura M.<sup>2</sup>

Jaime H. Mendoza C.<sup>3</sup>

Fundación Universitaria de Popayán  
Popayán – Colombia

El presente capítulo expone la creación de una directiva para la mejora del proceso productivo en la Industria Licorera del Cauca, basada en las técnicas operativas de Lean Manufacturing, enfocada en el control y eliminación de variables críticas, tales como tiempos improductivos, fallas en la línea de envasado, defectos de calidad, entre otros. Inicialmente, se elabora el VSM (Value Stream Map) [1], para visualizar en detalle el proceso productivo e identificar y priorizar a través de una Matriz de Vester [2] las variables críticas del proceso. Finalmente, se diseña el programa de mantenimiento productivo total – TPM [3], con el objetivo de reducir el número total de paradas no programadas en el proceso, relacionadas con el estado de la maquinaria en la línea de envasado. Se encontraron 9 variables críticas de 33 identificadas, son las más significativas porque generan paradas en el proceso, con la implementación de mejoras focalizadas, mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado y capacitación se logró minimizar paradas no programadas y mejorar el proceso en términos de disponibilidad de la infraestructura.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para las empresas en la actualidad, es fundamental la búsqueda y el desarrollo de estrategias para la optimización y mejora continua de los procesos productivos, facilitando la creación de espacios que potencien la innovación e impulsen el diseño e implementación de proyectos que evalúen el estado actual de las organizaciones, además de encaminar la identificación de sus puntos críticos para realizar el control, minimización y eliminación, obteniendo como resultado calidad, rentabilidad y eficiencia en los procesos y/o servicios que llevan a cabo.

La Industria Licorera del Cauca es considerada la empresa más importante del departamento, la cual produce y comercializa licores bajo los estándares más altos de calidad, obteniendo importantes reconocimientos a nivel internacional, como el Monde Selection, además de, contribuir con sus recursos al desarrollo socio-económico del departamento del Cauca. Teniendo esto en cuenta, se convierte en un espacio potencial para el desarrollo de distintas propuestas que mejoren su proceso productivo para llegar de forma exitosa a los objetivos organizacionales. En el presente capítulo se crea una directriz para la eliminación de las variables críticas del proceso productivo, basándose en las técnicas operativas: T.P.M (Total Productive Maintenance – Mantenimiento Productivo Total) pertenecientes a la filosofía Lean Manufacturing [4].

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Análisis diagnóstico e identificación de variables críticas mediante técnicas “Lean Manufacturing” para el proceso productivo.

Mediante el diagnóstico se analizó el proceso productivo de preparación y envasado de aguardiente en la Industria Licorera del Cauca, utilizando distintas herramientas para la elaboración del Mapa de flujo de valor (Value Stream Map – VSM), con la finalidad de identificar las variables críticas que impactan negativamente en el proceso; priorizar las más críticas y proponer mediante la aplicación de técnicas del Lean Manufacturing su control, seguimiento y eliminación.

El mapa de flujo de valor o VSM (Value Stream Map) (Figura 1) es un modelo gráfico utilizado como medio diagnóstico en el Lean Manufacturing, que proporciona información acerca de cada una de las operaciones o actividades llevadas a cabo para el desarrollo de un producto y/o servicio, identificando el flujo de información y de materiales desde el proveedor hasta el cliente final, además de los desperdicios que no agregan valor al proceso productivo, todo esto con el fin de eliminarlos e incrementar la eficiencia productiva [5]. Conforme al trabajo de campo realizado y a la construcción del Mapa de flujo de valor (VSM) se identificaron 33 variables de alto impacto negativo para la productividad de la empresa, tal y como se muestra en la Tabla 1. Sin embargo, para realizar el Diagrama de Pareto [6] (Figura 2), fueron descartadas 4 variables críticas (Falta de etiquetas, Rotura de envase, Aguardiente con partículas y Agua turbia) las cuales no tuvieron ningún tipo de incidencia negativa dentro del proceso, esto quiere decir, que no registraron ningún tiempo improductivo.

Como se observa en la Figura 1, la mayoría de tiempos improductivos, fueron generados principalmente por averías eléctricas en la Encartonadora y en el Triblock, adicionalmente se presentan tiempos improductivos por limpieza y

<sup>1</sup> joven.investigador.industrial@fup.edu.co

<sup>2</sup> juan.segura@docente.fup.edu.co

<sup>3</sup> jaime.mendoza@docente.fup.edu.co

desinfección, sin embargo esta variable no es considerada negativa, ya que la Industria Licorera del Cauca es una empresa que produce licores y debe cumplir la normatividad del decreto 3075 de 1997 sobre buenas prácticas de manufactura (BPM) [7], aunque se cuenta con un instructivo para ejecutar de forma eficaz la limpieza de las áreas productivas, se debe considerar complementar dichas actividades con programas de mejora, que involucren y comprometan a todo el personal de las áreas productivas.

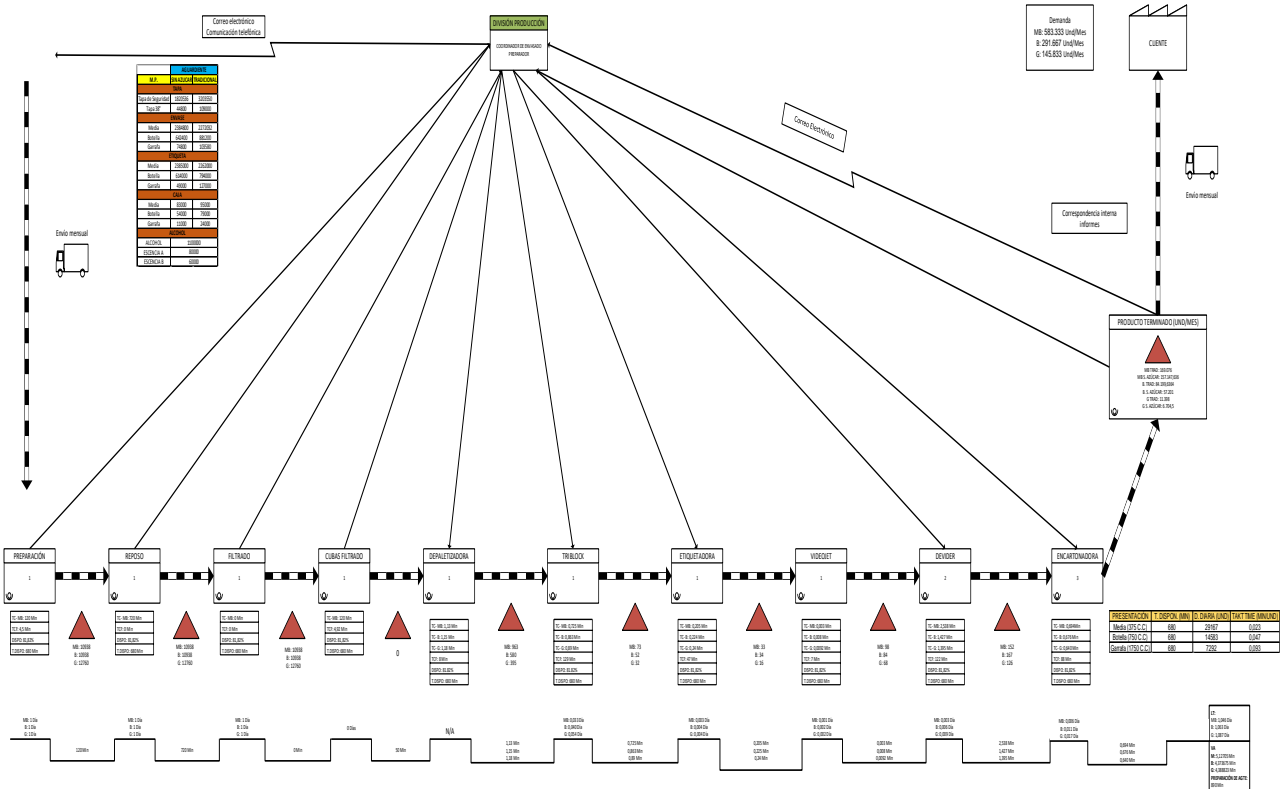


Figura 1. Mapa de flujo de valor del proceso productivo de preparación y envasado de aguardiente

Tabla 1. Variables Críticas encontradas en el proceso productivo de aguardiente

Variables críticas	Tiempo de parada (minutos)
Limpieza y desinfección	9.468
Avería Eléctrica en Encartonadora	6.308
Eventos, reuniones programadas, capacitaciones	5.879
Avería Eléctrica en Triblock	5.665
Cambio de presentación	4.712
Falta de personal	4.160
Mantenimiento de estructura civil	2.400
Falta de producto	2.109
Avería en Videojet	1.752
Avería Mecánica en Etiquetadora	1.510
Avería Mecánica en Depaletizadora	1.006
Avería Mecánica en Devider	759
Falta de envase	650
Mantenimiento línea de envasado (Máquinas)	479
Avería Mecánica en Encartonadora	449
Grado alcoholimétrico en producto	405
Falta de Agua	395
Falta de fluido eléctrico	288
Avería Eléctrica en Devider	237
Ajuste en equipos	220
SICC (Sistema de visión)	160
Avería Mecánica en Triblock	111
Avería Eléctrica en Depaletizadora	106
Falta de Cartón	95
Avería Mecánica en Sistema de Transporte	92
Inspección de materia prima en línea	65
Pegante en Encartonadora	58
Avería Eléctrica en Etiquetadora	25
Falta de tapas	13
Falta de etiquetas	0
Rotura de envase en la línea	0
Aguardiente con partículas	0
Agua turbia	0

De acuerdo con la Tabla 1 se puede establecer que la mayoría de tiempos improductivos son generados por averías de tipo eléctrico y mecánico en la maquinaria.

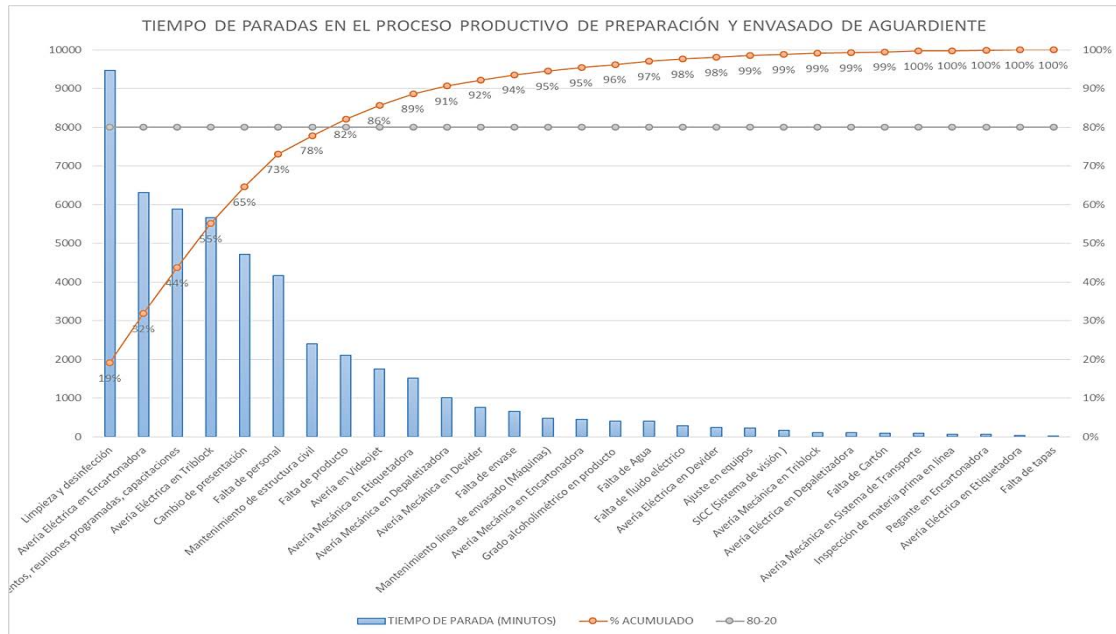


Figura 2. Tiempo de paradas en el proceso productivo de preparación y envasado de aguardiente

En cuanto al mantenimiento de obras civiles, fue necesario, ejecutar obras para la adecuación y mejoramiento de la infraestructura de las áreas productivas, generando pérdida de tiempo importante, sin embargo, al no ser constante, no se considera de alto impacto negativo para el proceso productivo. Por último, en el proceso de envasado de aguardiente se ejecuta un proceso llamado Cambio de Formato, en donde se generan grandes pérdidas de tiempo debido a la metodología utilizada por el personal de mantenimiento y la falta de organización del taller, donde se encuentran almacenadas todas las herramientas y piezas. La variable de eventos, reuniones y capacitaciones, no tienen ningún tipo de incidencia dentro de este trabajo, ya que, por políticas internas, se debe disponer del personal y el tiempo para cumplir con dichos compromisos.

## 2.2 Priorización de variables críticas para el proceso productivo

Se construyó una Matriz de Vester (Tabla 2), la cual “fue diseñada por el alemán Frederick Vester, como una técnica que facilita la identificación y determinación de las causas y consecuencias de una situación problemática”. El objetivo principal de esta matriz de priorización, es evaluar y determinar las causas y efectos que ocasionan las variables críticas al proceso. Anteriormente en la Figura 6 se muestran las 29 variables más recurrentes, las cuales representan aproximadamente el 78% de los tiempos improductivos, sin embargo, se decidió, tener en cuenta, solamente 14 variables, de acuerdo a la Tabla 1 y a la Figura 1 para la elaboración de la matriz. Para seleccionar las variables de mayor impacto negativo, en conjunto con los jefes de la división, se otorga un criterio de valoración de tipo numérico a cada variable, de acuerdo con la revisión literaria realizada:

- Sin relación directa (0)
- Relación mínima (1)
- Relación media (2)
- Relación Alta (3)

Se evaluó cada una de las variables dentro de los criterios de valoración anteriormente descritos y se obtiene la Matriz de Vester (Tabla 2).

Tabla 2. Matriz de Vester

MUDA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	TOTAL ACTIVOS
Limpieza y desinfección	1	0	0	0	2	2	3	0	1	1	1	1	0	1	13
Avería Eléctrica en Encartonadora	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	4
Avería Eléctrica en Triblock	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3
Cambio de presentación	4	2	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	8
Falta de personal	5	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4
Mantenimiento de estructura civil	6	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	2	10
Falta de producto	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Avería en Videojet	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Avería Mecánica en Etiquetadora	9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
Avería Mecánica en Depaletizadora	10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3
Avería Mecánica en Devider	11	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3
Falta de envase	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mantenimiento línea de envasado (Máquinas)	13	2	2	2	1	0	0	0	1	2	2	2	0	0	16
Avería Mecánica en Encartonadora	14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3
<b>TOTAL PASIVOS</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	

Se graficó en el plano cartesiano cada una de las variables, clasificándolas en cuatro grupos, tal y como se muestra en la Figura 3 de resultados.

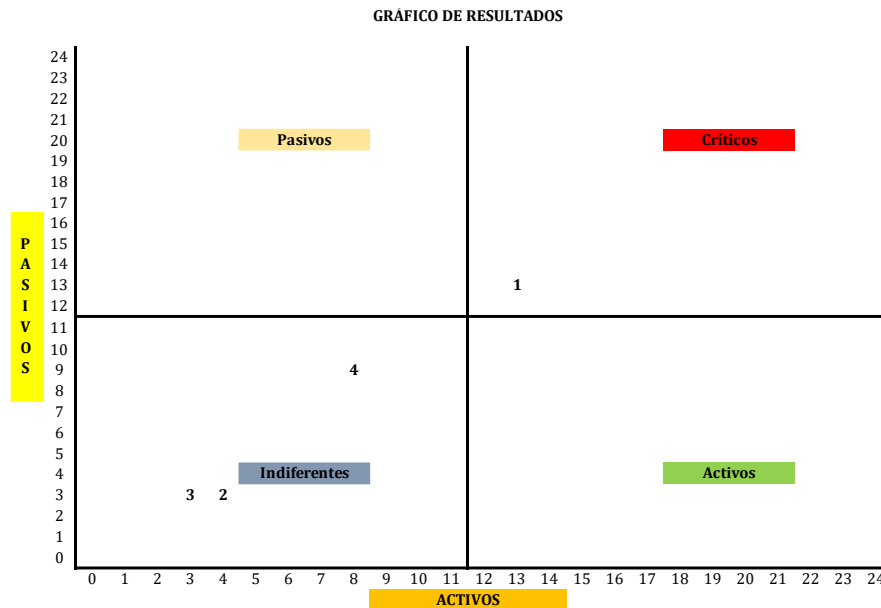


Figura 3. Gráfico de Resultados

De acuerdo con la Figura 3, las variables críticas que se en los cuadrantes activos y críticos son:

- Avería Eléctrica en Encartonadora
- Cambio de presentación
- Falta de producto
- Avería en Videojet
- Avería Mecánica en Etiquetadora
- Avería Mecánica en Depaletizadora
- Avería Mecánica en Divider
- Mantenimiento de la línea de envasado (Máquinas)
- Avería Mecánica en Encartonadora

Por lo tanto, estas son las variables que se deben controlar y minimizar, mediante el planteamiento de propuestas basadas en los pilares del Mantenimiento Productivo Total (TPM).

### 2.3 Propuesta de mejoramiento basado en los pilares del mantenimiento productivo total (TPM) en el proceso productivo

Para la Industria Licorera del Cauca, es sumamente importante mantener en óptimas condiciones operativas a la maquinaria y los equipos que son componente fundamental de los procesos de preparación y envasado de aguardiente. Con el desarrollo de los pilares del Mantenimiento productivo total (TPM), se pretende controlar y disminuir las averías, tiempos improductivos y otras variables que afectan la normal operación del proceso productivo.

#### 2.3.1 Situación actual

Es importante conocer los aspectos más importantes del proceso productivo, en especial, en el área de envasado, en donde se presentan la mayoría de las variables críticas, por lo tanto, se realiza la recolección de información acerca del proceso de mantenimiento y su relación con el proceso productivo.

- *Capacidad de producción* [8]: La Industria Licorera cuenta actualmente con una línea de envasado, en la cual se envasan tres presentaciones: Media 375 C.C., Botella 750 C.C. y Garrafa 1.750 C.C. La capacidad de producción se mide en base a la velocidad de la llenadora (Botellas por minuto). La capacidad de cada una de las máquinas se determina de acuerdo al formato o presentación del envase que se esté produciendo, además se determina el número de botellas y cajas teóricas que se deben producir. En la Tabla 3 se pueden observar los diferentes formatos o presentaciones con sus velocidades respectivas (Cajas y Botellas).

Tabla 3. Capacidad de producción de la línea de envasado. Fuente: Autores

Presentación	Unidades/caja	Velocidades	
		Cajas/hora	Unidades/hora
Media Botella (375 C.C)	24	250	6.000
Botella (750 C.C)	12	500	6.000
Garrafa (1750 C.C)	6	583	3.500



- **Indicadores de gestión de mantenimiento y producción:**

- **Plan de producción:** Este indicador evalúa la viabilidad de producción (Ecuación (1)).

$$Eficacia = \frac{Total\ Unidades\ Producidas}{Total\ Unidades\ Programadas} \times 100 \quad (1)$$

- **% Disponibilidad:** Identifica el % de disponibilidad para la producción (Ecuación (2)).

$$\% Disponibilidad = \frac{Tiempo\ Total\ de\ Operación}{Tiempo\ de\ Operación + Tiempo\ de\ paradas} \times 100 \quad (2)$$

- **Tiempo medio de reparación:** Identifica el tiempo que se demora el personal de en ejecutar el mantenimiento luego de una falla (Ecuación (3)).

$$Tiempo\ Medio\ para\ la\ Reparación = \frac{Tiempo\ de\ intervención\ correctiva}{Número\ Total\ de\ Fallas\ de\ la\ máquina} \times 100 \quad (3)$$

- **Tipos de mantenimiento:** Mantenimiento preventivo anual: Se ejecuta un plan preventivo de mantenimiento para corregir las averías en las máquinas. Para realizar estas actividades, cada máquina cuenta con un instructivo de operación, en el cual están consignadas las especificaciones técnicas para mantener en óptimas condiciones la maquinaria y equipos, dichas actividades se registran en la bitácora del proceso de mantenimiento FOMA03, todos los detalles de la ejecución de las actividades, se presentan en un informe al jefe de la división de producción. Para cumplir con el plan de mantenimiento preventivo debe contarse con los repuestos e insumos necesarios para dicha ejecución de acuerdo al comportamiento de los inventarios de repuestos.

- **Acciones Correctivas:** Durante la normal operación del proceso productivo, pueden presentarse averías e inconvenientes que pueden causar paradas inesperadas y pérdida excesiva de tiempo, un ejemplo de ello, es la operación inadecuada de las máquinas por parte de los operarios, la materia prima no conforme, entre otros; cuando este tipo de variables críticas se presentan, el personal de mantenimiento debe realizar acciones correctivas, es decir, realizar la reparación una vez se presente la avería o falla de la maquinaria. Dentro del tipo de intervención que realiza el personal de mantenimiento se pueden contemplar:

- **Mantenimiento paliativo o de campo (de arreglo):** Consiste en la reparación inmediata y puesta a funcionamiento de la maquinaria, aunque la fuente que provoco la avería no sea eliminada.
- **Mantenimiento Curativo (de reparación):** Consiste en la reparación inmediata de la avería, pero eliminando también la fuente que ocasiono dicha avería.
- **La gestión correcta del mantenimiento correctivo,** proporciona información acerca de las paradas que se generan en la maquinaria y equipos, para controlar y eliminar las causas que las originan, ya sea de forma inmediata o en un paro programado.

- **Cálculo del indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness o Eficiencia global de los equipos)** actual del proceso productivo. El indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness o Eficiencia global de los equipos), permite medir la eficiencia de la maquinaria de un proceso productivo; integra los factores más importantes de la producción: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad [9]. En la Industria Licorera del Cauca, no se tiene consolidado el OEE del proceso productivo, aunque tienen indicadores de gestión (KPI's) que miden factores importantes de la producción, se considera importante establecer el porcentaje de OEE, para la medición del proceso e identificar las oportunidades de mejora que incrementen la productividad del proceso (Ecuación (4)).

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (4)$$

Los criterios para evaluar el OEE en una empresa se establecen de la siguiente manera:

- 0% < OEE < 65% = Inaceptable. Muy baja competitividad.
- 65% < OEE < 75% = Regular. Baja competitividad. Aceptable si está en proceso de mejora.
- 75% < OEE < 85% = Aceptable. Continuar la mejora para avanzar hacia la World Class.
- 85% < OEE < 95% = Buena competitividad. Entra en Valores World Class.
- 95% < OEE < 100% = Excelente competitividad. Valores World Class.

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos, aplicando las fórmulas respectivas para el cálculo del OEE de cada presentación y por cada mes del año 2016, obteniendo que para Media el porcentaje más alto fue en el mes de diciembre con un 57,8%, para Botella fue en el mes de junio con un 47,8% y para Garrafa en el mes de septiembre con un 7,7%, estos porcentajes representan un nivel bajo de competitividad. El %OEE total para el año 2017 fue de 31,7%, el cual indica, de acuerdo a los criterios de evaluación del OEE, representa un nivel inaceptable, por lo que se requiere desarrollar estrategias de mejora para el proceso productivo, haciendo que la empresa sea mucho más competitiva y eficaz. Luego de identificar los aspectos generales de proceso actual de mantenimiento de la Industria Licorera del Cauca, se proponen las mejoras del proceso, de acuerdo a los pilares del Mantenimiento Productivo Total conforme a las variables críticas identificadas previamente.

**Tabla 4.** OEE del proceso productivo de la Industria Licorera del Cauca

	Presentación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
% Disponibilidad	N/A	87,24%	96,32%	85,54%	86,59%	89,34%	89,83%
% Rendimiento	MB y B	91,02%	0,07%	42,52%	72,07%	44,75%	77,39%
	G	0%	0%	5,3%	0%	3,1%	5,0%
% Calidad	Media Botella	98,50%	74,90%	98,90%	98,60%	99,20%	99,30%
	Botella	98,80%	0%	97%	98,30%	98,50%	99,9%
	Garrafa	0%	0%	95,5%	0%	97,7%	96,7%
% OEE	Media Botella	78,2%	0,1%	36,0%	61,5%	39,6%	69,0%
	Botella	78,5%	0%	35,3%	61,4%	39,4%	68,8%
	Garrafa	0%	0%	4,3%	0	2,7%	4,4%
	Presentación	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
% Disponibilidad	N/A	90,11%	86,29%	85,59%	94,63%	87,33%	93,29%
% Rendimiento	MB y B	39,78%	59,46%	48,70%	19,15%	31,43%	51,59%
	G	0%	1,2%	6,8%	0%	3%	1,7%
% Calidad	Media Botella	99,2%	99,3%	99,6%	99,4%	99,7%	97,0%
	Botella	98,8%	99%	98,4%	0%	97,7%	97%
	Garrafa	0%	96,5%	97,2%	0%	96,3%	97,6%
% OEE	Media Botella	35,5%	51,0%	41,5%	18%	27,4%	47,7%
	Botella	35,4%	50,8%	41%	0%	26,8%	46,7%
	Garrafa	0%	1%	5,7%	0%	2,6%	1,5%

- *Mantenimiento Autónomo* [10]. Para el desarrollo del pilar de mantenimiento autónomo en el proceso productivo, se establecen siete pasos, que representan las funciones y responsabilidades que deben cumplir las áreas de mantenimiento y producción en la ejecución de las actividades de mantenimiento.
  - *Pasos 1 y 2:* Limpieza inicial y control de fuentes de contaminación. Este paso va fuertemente ligado al desarrollo de un programa de 5'S (Ver 6.3.1 PROPUESTA 1: LAS 5'S). De acuerdo a esto, se debe realizar una jornada de capacitación, sobre el orden y limpieza del área. Se puede realizar una misma jornada para el primer paso del mantenimiento autónomo y para iniciar o complementar el programa de las 5'S.

El punto de partida del mantenimiento autónomo es la capacitación, en donde, mediante material didáctico, se imparten los conocimientos básicos e importancia de este pilar para el proceso productivo, se debe involucrar a los operarios, al personal de mantenimiento, los coordinadores, los jefes de mantenimiento y producción, en todas las actividades, ya que serán parte importante, en la generación de oportunidades de mejora para el proceso, para esto se crean unas listas de chequeo, en donde se llevara registro de las sugerencias que realicen, todas las sugerencias que se entreguen, serán evaluadas directamente por los integrantes de la división de producción o el comité de TPM, para mejorar el proceso. Se deben realizar jornadas de limpieza de acuerdo a los procedimientos establecidos en la empresa, para el control y eliminación de fuentes contaminantes que pongan en peligro la calidad del producto, desarrollando paralelamente un programa de 5'S.

- *Paso 3:* Estandarización de condiciones de limpieza, desinfección y lubricación.

*Limpieza y desinfección:* La división de producción cuenta con un instructivos, formatos y cronogramas (FODP19, INDP03, DOCC22 y FOCC13), donde se establecen todas las actividades que el personal debe ejecutar en las áreas productivas, sin embargo, es importante incluir todas aquellas nuevas actividades que surjan de acuerdo al establecimiento del programa de las 5'S o del 1 y 2 paso del mantenimiento autónomo.

La estandarización de estos procedimientos, requieren de un alto compromiso de todos; es importante que los jefes de las áreas transmitan los conceptos básicos, motiven y direccionen al personal para que participen de forma activa y proponente de todas las actividades establecidas en los programas que desarrolla la empresa. Para llevar a cabo el buen desarrollo del mantenimiento autónomo es muy importante comenzar con las siguientes acciones:

- Jornadas de capacitación, en donde se expliquen los conceptos básicos de los distintos programas que se ejecutan en la empresa, en relación con la limpieza y desinfección de las áreas productivas, adecuadas prácticas operativas y demás procedimientos establecidos.
- Definir las responsabilidades y obligaciones que el personal de las áreas productivas debe cumplir de acuerdo a los procedimientos y estándares establecidos, entres los operarios, coordinadores y jefes de la división de producción.

*Lubricación:* Para la lubricación de las máquinas, es importante que el operario haya recibido capacitación y entrenamiento, para realizar de forma adecuada dicha actividad. La lubricación permite el correcto funcionamiento de la maquinaria, disminuyendo el desgaste, rozamiento y deterioro de las piezas y partes móviles de las máquinas, que puedan ocasionar daños irreparables, paradas no programadas, aumento de unidades defectuosas y pérdida de tiempos por ajustes.

- *Paso 4:* Inspección general de la maquinaria: Como ya se ha hecho mención, para el mantenimiento autónomo es muy importante el entrenamiento de los operarios, quienes con el personal de mantenimiento se encargarán de inspeccionar minuciosamente las máquinas, diligenciando las listas de chequeo que se establezcan para tener control del procedimiento, todo esto con el fin de identificar daños, averías, suciedad y otros factores que pueda afectar la normal operación de las máquinas, como resultado de estas inspecciones, surgen las solicitudes de mantenimiento, según las falencias presentadas. Algunos factores que pueden influir negativamente en el proceso de inspección pueden ser:
  - La falta de tiempo para realizar la inspección de la máquina.
  - Revisión de muchos elementos, lo que puede provocar fatiga en el operario.
  - La desactualización de los instructivos de operación de la máquina, los cuales contienen todos los conceptos técnicos de las mismas; este punto puede influir negativamente, porque este material ayuda al operario a entender la operación de la máquina, si están desactualizados, considerando que la máquina haya sufrido algunos cambios, estos no los conocerá el operario por tanto, si se genera algún daño en dichas modificaciones, puede ocasionar un daño mayor, por la no detección temprana del mismo.
  - Poca disposición para realizar la inspección por parte del operario, que puede considerarse que es trabajo exclusivo del área de mantenimiento.
  - Falta de habilidad del operario para ejecutar la inspección.

La frecuencia con que se deben realizar las inspecciones las establece el jefe de mantenimiento y el comité de TPM. Aunque se sugiere que sea diario, sin embargo, se puede considerar que este tipo de inspecciones ocasionan pérdida de tiempo.

*Listas de chequeo:* Las listas de chequeo son diseñadas por el jefe de mantenimiento, quien es la persona más idónea para realizar dicha tarea, contando con el apoyo del personal de mantenimiento; deben hacerse 1 lista de chequeo por máquina, ya que cada una cuenta con especificaciones técnicas diferentes. En cuanto a tiempo y frecuencia, son establecidas, como se mencionó anteriormente por el jefe de mantenimiento, en compañía del personal de mantenimiento, quienes conocen las actividades de inspección y la duración de las mismas, ese tiempo se estandarizará, por lo tanto, el operario debe demorarse única y exclusivamente el tiempo que se establezca en la lista.

- *Paso 5:* Inspección autónoma. De acuerdo a todos los estándares establecidos y a las capacitaciones para los operarios, estos se encuentran en la capacidad de realizar las inspecciones necesarias a la maquinaria de forma detallada, además de realizar la limpieza y lubricación. En este paso se evalúan las actividades realizadas, con el fin de identificar y proponer estrategias de mejora que aporten significativamente al perfeccionamiento de los estándares propuestos. Para llevar a cabo el perfeccionamiento de los estándares en la inspección autónoma, se siguen los siguientes pasos:
  - Programar reuniones, donde se evalúen los estándares establecidos, su impacto y cumplimiento, con el fin de perfeccionar, mejorar o modificar aquellos lineamientos que no ha alcanzado las expectativas esperadas.
  - El jefe de mantenimiento o la persona más idónea, deberá establecer un nuevo documento, donde se incluyan las modificaciones, aportaciones y demás puntos que cree conveniente establecer en el nuevo documento, este debe ser claro y entendible para todo el personal del proceso. También deberá establecer fechas, actividades, responsabilidad y demás aspectos importantes para que se tengan en cuenta al momento de difundir la inspección autónoma y en general el mantenimiento autónomo.
  - La división de producción, deberá utilizar distintos canales de difusión, tales como: carteleros, circulares, correo electrónico, entre otros, para informar de los cambios que se realizan en los estándares establecidos.
  - Brindar a todo el personal las capacitaciones y entrenamiento necesario para que las actividades sean ejecutadas lo mejor posible.
  - Establecer mecanismos de evaluación periódica del cumplimiento de los estándares, este control lo pueden hacer los jefes, en compañía del comité de TPM.
- *Paso 6:* Organización. En este paso se estructura todo el mantenimiento autónomo, se asignan las responsabilidades y compromisos de todo el personal en las distintas actividades que conduzcan al cumplimiento de los estándares establecidos por la división de producción y el comité TPM.

#### *Funciones del personal*

*Operarios:* Con la implementación del mantenimiento autónomo, luego de realizar las capacitaciones y entrenamiento del personal, se asignan las responsabilidades que cada operario adquiere para mantener el estado óptimo de la maquinaria, haciendo énfasis en prevenir el deterioro y detectar las averías tempranas mediante inspección. Dentro de las nuevas responsabilidades que el personal adquiere, se pueden encontrar:

- Correcta operación de la máquina.
- Mantener las condiciones óptimas del equipo.
- Inspección y detección de averías tempranas.

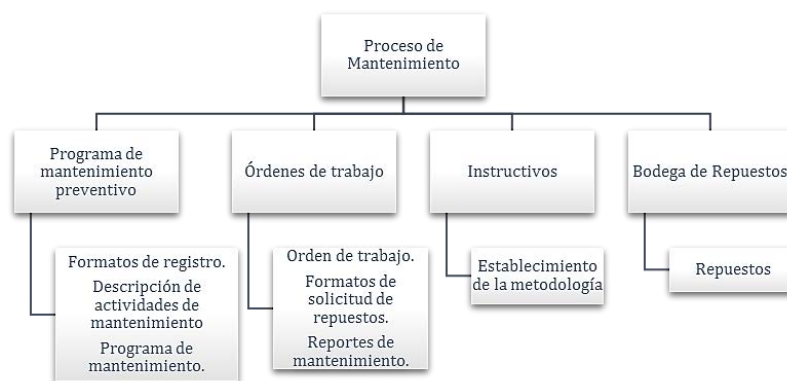
- Realizar, mediante listas de chequeo el registro de datos, observaciones, sugerencias y todos los aspectos que establezca el jefe de mantenimiento para llevar un control adecuado del proceso.
- Apoyar al personal de mantenimiento en la reparación y ajustes de averías menores, siempre y cuando se cuente con el entrenamiento y la habilidad requerida para realizar dicha actividad.
- Participar activamente en el proceso de mejoramiento continuo.

*Personal de mantenimiento:* El personal de mantenimiento, es parte fundamental en el desarrollo e implementación del mantenimiento autónomo. Dentro de las actividades que deben cumplir se encuentran:

- Apoyar en el proceso de entrenamiento a los operarios.
- Acompañar las actividades de inspección a la maquinaria.
- Contribuir con el perfeccionamiento y la búsqueda de estrategias de mejoramiento continuo del proceso.
- Participar en las actividades de entrenamiento y capacitación para afianzar habilidades y conocimientos.

#### ▪ *Mantenimiento Planificado* [10]

- *Mantenimiento preventivo* en la Industria Licorera del Cauca: El diseño de una nueva propuesta de un programa de mantenimiento preventivo, se realiza con el objetivo de fortalecer el programa actual que gestiona y ejecuta el área de mantenimiento. A continuación, se plantea la estructura (Figura 4) del plan de mantenimiento preventivo:



**Figura 4.** Estructura del programa de mantenimiento preventivo

Elaboración del programa de mantenimiento: Luego de definir la estructura del nuevo programa de mantenimiento preventivo se procede a elaborar los documentos necesarios para garantizar el control y seguimiento del proceso y el éxito del mismo. Con el programa de mantenimiento se establecen los criterios y procedimientos para garantizar las condiciones óptimas de la maquinaria y los equipos.

Programa de mantenimiento: La elaboración del programa de mantenimiento permite establecer una metodología clara para realizar las diferentes actividades de mantenimiento, para esto, el comité de TPM, en conjunto con el Jefe de área, deben evaluar el procedimiento existente en el documento DOMA02, y someterlo a modificaciones que se ajusten a la nueva metodología, o si se considera necesario, se plantea un nuevo documento. Para la elaboración del programa de mantenimiento se deben realizar las siguientes actividades: registro de máquinas, descripción de las actividades de mantenimiento, programación de mantenimiento, órdenes de trabajo, materiales y repuestos, instructivos de mantenimiento, manual de mantenimiento, bodega de repuestos.

- *Formación y adiestramiento:* La capacitación y entrenamiento del personal de las áreas productivas en temas de producción y mantenimiento, es el principio fundamental del Mantenimiento Productivo Total. (TPM). Sin este principio como método inicial para el desarrollo de los pilares del TPM, no se tendrá ningún tipo de impacto para el proceso, sin embargo, es importante tener en cuenta que el cambio metodológico de cualquier procedimiento, implica cierta resistencia por parte del personal.

Uno de los puntos más importantes del TPM, es el aprendizaje constante en cuanto a conceptos nuevos, la socialización de la actualización de los procedimientos, formatos y documentos de la división de producción en general, además de la capacidad de aprender nuevas habilidades para la ejecución de las distintas actividades pertenecientes tanto a producción y mantenimiento. El trabajo en equipo es uno de los puntos fundamentales, por lo tanto, es importante las capacitaciones por parte de personal especializado para fomentar la importancia y beneficios del trabajo en equipo.

### 3. CONCLUSIONES

Los resultados de este proyecto permiten resaltar la relevancia del mantenimiento dentro de un proceso productivo, la forma de ejecución de las tareas de mantenimiento impactan en la productividad directamente, por ello se utilizaron

herramientas Lean Manufacturing para la identificación de los problemas, por ejemplo, la construcción del mapa de flujo de valor (VSM) permite visualizar el proceso productivo de forma detallada para establecer las variables críticas que no agregan valor alguno al proceso e iniciar acciones correctivas que permitan el control y minimización de dichas variables; mediante la Matriz de Vester se clasifican y seleccionan las variables críticas existentes en el proceso productivo, así mismo, la matriz de priorización se elaboró con el fin de seleccionar las técnicas del Lean Manufacturing más convenientes para el control y minimización de las variables críticas del proceso productivo.

Luego de la identificación de puntos críticos de mantenimiento, se realizó el programa de las 5'S para mejorar el ambiente de trabajo, enfocándose en el desarrollo y mantenimiento de las 3S (Orden, Limpieza y Clasificación), se estandarizan los procedimientos y se mejora los hábitos comportamentales de los operarios durante la ejecución del proceso y en el área productiva; en esta misma dirección, se desarrollaron las diferentes fases de la técnica S.M.E.D para la disminución de tiempos improductivos en el proceso de cambio de formato. Se actualizó el instructivo basado en el estándar internacional de automatización ISA S88 y se elaboraron 2 listas de chequeo para el control y seguimiento del proceso, con el fin de perfeccionar e identificar oportunidades de mejora que garanticen su éxito a largo plazo.

Toda esta implementación y la gestión del conocimiento obtenido se ve reflejada en el planteamiento de nuevos parámetros para el área de mantenimiento de acuerdo a los pilares del TPM aplicables al proceso documentados en la actualización del programa de mantenimiento preventivo y la elaboración de formatos complementarios a los existentes en el área de mantenimiento, con la proyección de mejora de indicadores propios del proceso.

## REFERENCIAS

- [1] Rohac, T. (2015). Value Stream Mapping Demonstration on Real Case Study. *Procedia Engineering* 200, 520–529.
- [2] Ingenio (2016). Matriz de Vester para la priorización de problemas. Online [Nov 2017].
- [3] Gómez, A. et al. (2015). Factores críticos de éxito para el despliegue del mantenimiento productivo total en plantas de la industria maquiladora para la exportación en Ciudad Juárez: una solución factorial. *Contaduría y Administración* 60, 82-106.
- [4] Arciniegas, S., Mendoza, J. & Segura, M. (2017). Technical Assistance in Documentation and Instructive Updating Supported in the “S.M.E.D”. To Change of Format in the Package Line in the “Licorera Del Cauca” Industry. In *Conferencia Internacional de Ingeniería Industrial y administración de operaciones*.
- [5] Morelos, G. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina. *Estudios gerenciales* 23, 120-126.
- [6] Gutiérrez, P. & De La Lara, S. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. Mc Graw Hill.
- [7] Ministerio de salud y protección social (2016). *Buenas Prácticas de Manufactura*. Resolución 1106, 1-127
- [8] Viveros, R. & Salazar, E. (2010). Modelo de Planificación de Producción para un Sistema multiproducto con múltiples Líneas de Producción. *Revista Ingeniería de Sistemas* 24, 89-102.
- [9] Dunn, T. (2015). *Eficacia OEE. Embalaje Flexible*. William Andrew Publishing.
- [10] Rodríguez, G. & Roncallo, R. (2013). Diseño de un plan maestro para la implantación del Total Productive Maintenance (TPM) en los procesos productivos de la empresa XAR LTDA. Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana.

Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) son ampliamente utilizados para la generación de energía renovable a pequeña escala en zonas no conectadas a la red eléctrica. Después de una serie de conversaciones de paz para la reconciliación entre las partes principales de un conflicto de medio siglo, un acuerdo de paz finalmente fue firmado en la capital de Colombia el 26 de noviembre de 2016. En consecuencia, un escenario de posconflicto debe manejarse. Las iniciativas para garantizar la seguridad energética de las comunidades vulnerables que están siendo reubicadas en áreas remotas de Colombia y la reducción de emisiones de GEI son prioridades en este contexto. Por lo tanto, el presente estudio busca presentar como alternativa viable para fomentar la investigación en el campo de las energías renovables, reducir emisiones de GEI y potencialmente suplir de energía eléctrica a comunidades vulnerables que no están conectadas a la red, la modificación y simulación a través de CFD del rotor Savonius clásico para incrementar su rendimiento. Para ello, 13 escenarios fueron propuestos frente a la configuración convencional y así identificar la configuración de mayor rendimiento. Como resultado, se obtiene una configuración con una mejora de más del 4% con respecto a la configuración convencional.

Nomenclature			
$A$	área de barrido rotor	$\bar{u}_i$	velocidad promedio del aire
$D$	diámetro rotor	$u'_i$	oscilación velocidad por turbulencia
$De$	diámetro de placa	$z$	grosor de palas
$d$	longitud de cuerda	$\beta$	relación de viscosidad turbulenta
$e$	relación superposición "overlap ratio"	$\beta^*$	constante modelo de turbulencia
$C_m$	coeficiente de torque	$\delta_{ij}$	Kronecker delta
$C_p$	coeficiente de potencia	$\varepsilon$	relación disipación de turbulencia
$C'_f$	coeficiente local de fricción	$\rho$	densidad del aire
$h$	espaciamento entre palas	$\bar{p}$	presión promedio
$k$	turbulent kinetic energy	$\tau_{ij}$	término de tensión de estrés de Reynolds
$Nb$	number de cuartos de pala	$\gamma$	coeficiente modelo combinado
$P$	potencia	$\sigma_k \sigma_\omega$	números de turbulencia de Schmidt
$P_i$	potencia entrada	$\mu$	viscosidad dinámica del aire
$P_o$	potencia salida	$\mu_T$	viscosidad de Eddy
$Re_L$	número de Reynolds	$\nu_t$	difusividad de turbulencia
$t$	duración de cada paso	$\Omega$	velocidad angular
$T$	torque	$\omega$	proporción de disipación específica
$TSR$	"Tip Speed Ratio"	$x$	dirección de flujo
$R$	radio del rotor	$y$	distancia del primer nodo desde pared
$U$	velocidad viento	$y^+$	parámetro adimensional
$U_t$	velocidad de fricción		

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, hay problemáticas puntuales a escala global que requieren ser abordadas y priorizadas por todas las naciones, para alcanzar un real y equitativo desarrollo sostenible [1–3]. El cambio climático es una de ellas, un fenómeno con implicaciones mundiales y en continuo aumento a causa de aspectos como la ganadería extensiva, la agricultura basada en monocultivos, los cultivos para alimentar animales de engorde, los cultivos para obtener biocombustibles en suelos productivos, el uso de combustibles fósiles. En consecuencia se generan emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI), aumenta la degradación ambiental, se presentan desplazamientos forzados de comunidades vulnerables y se intensifican los conflictos armados en países en vías de desarrollo, además de incentivar prácticas casi irreparables a escala humana como lo es la deforestación [4–11].

Se debe generar proyectos incluyentes desde el punto de vista de la sostenibilidad desde el ámbito social, ambiental y económico, que creen alternativas para mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables [12,13]. El 25 de septiembre de 2015, la Organización de Naciones Unidas (ONU) pronunciaron el posible escenario de un mundo idealista que se espera sea una realidad dentro de los tiempos señalados. Esta ambiciosa iniciativa está basada sobre 17 ODS (objetivos de desarrollo sostenible), establecidos con el propósito de suprimir las condiciones extremas de pobreza, mejorando la calidad de vida de comunidades vulnerables en todo el mundo antes de 2030. La presente investigación busca aportar en alguna proporción a los objetivos siete, el cual apunta por garantizar el acceso universal a energías limpias, asequibles y confiables; y trece, encargado de combatir el cambio climático [3,14–17].

<sup>1</sup> iostos83@gmail.com

<sup>2</sup> ivanruizhidalgo@gmail.com

<sup>3</sup> cacollazos@gmail.com

Ambos objetivos procuran garantizar el acceso a energía limpia, asequible y confiable con una mayor participación de tecnologías limpias generadoras de ER (energía renovable) en la matriz energética global, destacando la necesidad de enfocarse en comunidades vulnerables o marginadas en países en vías de desarrollo a través de acciones que mitiguen y reduzcan los impactos del cambio climático. En síntesis, es hora de garantizar condiciones justas y equitativas de seguridad energética a la población mundial, que conlleven a reducir emisiones de CO<sub>2</sub> a través de acciones concienzudas [3, 14–16, 18–21].

La población colombiana, principalmente la identificada como vulnerable, ha presenciado el conflicto interno más antiguo en América Latina hasta la fecha entre las FARC (Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia) y el gobierno colombiano. Más de 50 años de violencia dejando atrás desplazamientos forzados, masacres, desapariciones, exclusión social, procesos deficientes de participación comunitaria, denegación de derechos territoriales ancestrales, distribución desigual de tierras legales e ilegales y acaparamiento. Más de ocho millones de víctimas, seis millones de refugiados y cerca de 3,5 millones de personas que sufren desplazamiento forzado de las zonas rurales hacen de Colombia el segundo país con mayor población desplazada después de Siria [7, 11, 22–25].

Después de una serie de diálogos históricos entre las principales partes involucradas en pos de la reconciliación y con la esperanza de dar fin a un conflicto de medio siglo, se abrió la posibilidad a una salida pacífica. El 26 de noviembre de 2016 fue firmado en la capital de Colombia, Bogotá, un acuerdo de paz que logró reunir la mayor parte de los intereses de cada parte [11, 26]. Ahora, el desafío real es afrontar un escenario posterior al conflicto junto con todas sus necesidades, un país entero en transición hacia un estado social y político más estable. La falta de acceso adecuado a gas y electricidad, agua potable, tratamiento de residuos, carreteras y educación de las comunidades vulnerables en Colombia, son algunos de los grandes desafíos que deben ser identificados y resueltos durante el posconflicto. Es necesario implementar adecuados incentivos que promuevan el desarrollo rural de propietarios de pequeñas tierras, la restitución de tierras, la cobertura y la expansión de los servicios de energía [7, 11, 15, 22, 23, 25, 27].

Las Naciones Unidas a través de sus programas PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) y ACNUR (Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados), se interesaron en ayudar a fortalecer el proceso de transición que vive el país a través de la creación e implementación del programa denominada IST (Iniciativa de Solución Transicional). Esta iniciativa está enfocada en identificar, proponer y desarrollar alternativas que alivien e impulsen proyectos productivos, además de ser un ente de protección en el proceso. Un total de 17 comunidades fueron incluidas en el programa de acuerdo a sus condiciones de vulnerabilidad frente al posconflicto [28]. Alrededor de 1.3 millones de personas en Colombia viven en áreas remotas no conectadas a la red nacional, aproximadamente el 63% tienen un servicio no confiable e intermitente con un servicio promedio de 5.3 horas por día de electricidad, mientras que el 37% restante no cuenta con acceso a electricidad [29].

Cerca de 10 minutos en carro, a través de un estrecho y difícil camino sin pavimentar desde el municipio de Ricaurte, Nariño, cerca de la frontera entre Colombia y Ecuador. Hay una pequeña comunidad ubicada en lo que se considera como una zona remota e inhóspita de Colombia. El RI-EC (Resguardo Integrado Edén Cartagena) se compone de 132 familias de la etnia Awa, aproximadamente 524 víctimas de desplazamiento forzado y el 52% de ellas son mujeres cabeza de familia. Actualmente, la comunidad no cuenta con alumbrado público ni servicio domiciliario de electricidad, traduciéndose en focos de violencia e inseguridad durante la noche. Las entidades gubernamentales encargadas le dijeron a la comunidad que se llevarían a cabo las instalaciones necesarias para que contaran con alumbrado público y servicio eléctrico en cada casa, pero esto no ocurrió. Así, los Awas establecieron conexiones improvisadas sin ningún tipo de protección, generando un riesgo constante a la población [30–32].

Se identificó una *DH* (demanda promedio hora por casa) de 15Wh por tres lámparas tipo LED de 5W que se accionan por siete (7) horas aproximadamente durante el día. En consecuencia, se obtuvo una *DD* (demanda diaria de iluminación doméstica promedio) de 105Wh por día [30–32]. El área donde está ubicado el RI-EC presenta uno de los niveles de radiación solar más bajos del país, con 10 a 14 horas de no sol por mes y menos de 2.5 horas diarias de brillo solar [33–36], lo cual descarta el uso de generación FV (fotovoltaica). En contraste, la zona ofrece los valores de viento más altos de la región, con un *U* (velocidad del viento) promedio de 5m/s [37,38], abriendo la posibilidad a proyectos de energía eólica a pequeña escala para suplir la *DD*.

Se decide trabajar con un VAWT (Aerogenerador de Eje Vertical) tipo de Savonius por su bajo costo de construcción, instalación y mantenimiento; su independencia de operación a la dirección del viento y por presenta menor desgaste en las partes móviles. El rotor Savonius se caracteriza no solo por presentar un significativo arranque a bajas velocidades de viento, también por su capacidad de operar a bajas velocidades de viento produciendo niveles de ruido de tolerables a bajos. Asimismo, las turbinas Savonius tienen un cuerpo robusto y resistente, sus sistemas mecánicos se pueden instalar al nivel del suelo. No representan riesgos significativos a las aves comparado con otros tipos de turbinas, además son adecuadas para el desarrollo de asequibles proyectos eólicos a pequeña escala [39–44].

Las turbinas Savonius están compuestas de un par de cuchillas semicirculares de sección transversal en forma de "S" con una superposición característica en el medio. Estos rotores requiere menos arrastre para su arranque, la variación en arrastre es usada para girar la turbina [45,46]. La baja eficiencia del rotor Savonius es una de las mayores desventajas en comparación a otros aerogeneradores, esta situación responde principalmente a que una aspa se



mueve contra el viento mientras que el otro sigue la dirección del viento [47, 48]. Debido a la versatilidad del rotor que permite realizar modificaciones a partir de su geometría original, se han desarrollado diferentes modelos alternativos al clásico, en busca de aumentar el rendimiento del sistema [41, 49, 50].

Roy y Saha 2015 [51] estudiaron cinco configuraciones diferentes y compararon principalmente su  $C_p$  (coeficiente de potencia). Ellos presentaron una configuración de dos palas denominada SSWT (*Savonius Style Wind Turbine*) contra un rotor tipo Bach modificado, uno Benesh, uno semi-elíptico y uno semicircular convencional. Los últimos cuatro fueron propuestos por otros investigadores. La nueva cuchilla desarrollada alcanza un  $C_p$  de 0.27 a una TSR (relación de velocidad de punta) = 0.77. El rotor SSWT afirma un incremento relevante en el coeficiente de potencia máximo sobre las turbinas Bach, Benesh, semi-elíptica y convencional del 3.3%, 3.9%, 19.2% y 34.8%, respectivamente. Usando una corrección de bloqueo de túnel, se logró un  $C_p$  máximo de 0.31 para la modificación SSWT.

Otro autor [52] sugiere un trabajo comparativo para dos configuraciones diferentes de turbina Savonius, un rotor convencional y una nueva configuración de cuchillas múltiples. Las simulaciones numéricas fueron ejecutadas por el software CFD, Ansys CFX. Se obtuvieron valores máximos de  $C_p$  de 0.2081 y 0.2266 con  $U = 8.23 \text{ m/s}$ . El estudio reporta un acrecentamiento en el rendimiento del 8,89% ya que, con la adición de los cuartos de pala, se logra capturar parte de la energía cinética no utilizada de la corriente del viento. Una investigación desarrollada por Saha et al. 2008 [53], compara el número de etapas, el número de álabes y la geometría del rotor. Plantea un sistema de dos etapas con dos y tres palas semicirculares y retorcidas. Se concluye que el rotor Savonius de dos etapas es más eficiente al ser comparado con los rotores simples y de tres etapas. Igualmente, se encontró que el número óptimo de cuchillas es dos para el rotor Savonius a pesar del número de etapas. En adición, se determina que las cuchillas retorcidas funcionan mejor que las cuchillas semicirculares. Se reportó un  $C_p$  máximo de 0,31 a  $U = 7,30 \text{ m/s}$ .

Palas altas curvadas para reemplazar el rotor Savonius convencional con la adición de un sistema de cortinas transportadoras-deflectoras, es la propuesta de Tartuferi et al. 2015 [54]. Los investigadores transformaron aerodinámicamente un perfil Goettingen 462 para así obtener uno nuevo. Un segundo perfil se propuso imponiendo el grosor de un perfil NACA 0012 sobre una línea Camber. Las nuevas combinaciones generadas fueron denominadas como SR3345 y SR5050, respectivamente. Conjuntamente, el sistema deflector estaba formado por dos apéndices para encerrar el rotor Savonius. El primero guía el viento entrante y el otro se coloca para reducir la presión dinámica de actuación. A  $U = 9 \text{ m/s}$ , el rotor SR3345 alcanzó un  $C_p$  máximo = 0.22, el perfil SR5050 un  $C_p$  máximo = 0.25 y el sistema con las cortinas deflectoras un  $C_p$  máximo = 0.3. Lee et al. 2016 [55] proporciona un análisis de rendimiento al variar los ángulos de giro de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  para una turbina eólica Savonius helicoidal. Como resultado, se describió que con un ángulo de giro de  $45^\circ$ , a una TSR = 0.54, se puede conseguir un  $C_p$  máximo = 0.13.

Una investigación para evaluar el efecto de seis diferentes  $e$  (relación de superposición o *overlap ratio*, según su definición en inglés), 0.0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 y 0.30 en turbinas Savonius es llevada a cabo por Roy y Saha, 2013 [56]. El estudio determinó que con un  $e = 0.20$  y  $U = 10.44 \text{ m/s}$  se lograban mayores rendimientos. Otros autores [57], a través de herramientas CFD, plantean una evaluación numérica de diferentes  $e$ , 0.0, 0.15, 0.3, 0.45 y 0.6. Se reportó que bajo una TSR de 1.25, para obtener un  $C_p$  máximo = 0.3161 se debe usar un  $e = 0.15$ .

El presente trabajo procura contribuir a incentivar la investigación de tecnologías generadoras de energía limpia y renovable para resaltar la importancia y el alto potencial de las FNCE (fuentes no convencionales de energía) en una Colombia que necesita garantizar la seguridad y justicia energética de sus habitantes, con prioridad en la población vulnerable víctima de la guerra bajo un escenario de posconflicto. En consecuencia, se lograría aportar a la mitigación del calentamiento global a través de la implementación de proyectos adecuadamente estructurados, como resultado del estudio de alternativas que permitan a la población el acceso y propiedad de sistemas eficientes de ER [3,9,15,17,29,58–61]. Por lo tanto, se genera la necesidad de proponer una alternativa eficiente y asequible, que permita a la comunidad indígena del RI-EC acceder a energía eléctrica a través de un sistema confiable, seguro y eficiente.

En consecuencia, la presente investigación propone una nueva configuración de la turbina Savonius con el objeto de incrementar su rendimiento. Lo anterior, buscando generar energía renovable como alternativa para satisfacer la demanda de energía básica del RI-EC, localizado en zonas remotas de Colombia, mediante el uso de herramientas CFD.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 Descripción del modelo numérico

ANSYS es un potente y versátil programa, ampliamente reconocido y usado para análisis CFD. Este es capaz de realizar estudios detallados para analizar flujos aerodinámicos complejos e inestables asociados con situaciones operacionales de aerogeneradores para simulaciones 2D-3D transitorias desde la generación de geometrías CAD hasta el post-procesamiento de los resultados [62–64]. Para el presente trabajo, se realizan simulaciones y análisis usando mecánica de fluidos computacional en 2D Ansys Fluent 18.0. Fluent tiene el potencial de proporcionar simulaciones realísticas del campo de flujo de las diferentes configuraciones de rotor propuestas en este estudio, además de resolver problemas de flujo alrededor de sus complejas geometrías y así obtener resultados cuidadosamente establecidos y más precisos[65–68].

## 2.2 Configuraciones geométricas propuestas

Como fase inicial, se realizó una comparación de los valores de  $C_p$  y  $C_m$  (coeficiente de torque) entre un rotor Savonius convencional y uno perfilado. En la Figura 47, se muestra la sección transversal de un rotor convencional y perfilado. Sus dimensiones son detalladas en la Tabla 28. La sección del perfil se construyó con base al rotor convencional, la circunferencia exterior es un semicírculo con diámetro  $d$ . El arco interno es el resultado de unir la curva AB a la curva BC, que son tangentes entre sí a B. Este punto tangente se localiza en  $L = 0,24D$  como se muestra en la Figura 47. Además, la curva BC es  $\frac{1}{4}$  de un círculo con centro en la línea de CA. Los escenarios propuestos tendrían un grosor de 2 mm siguiendo lo sugerido por Ferrari et al, 2017 [69]

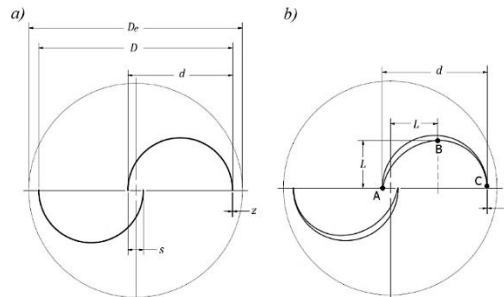


Figura 47. Sección transversal del rotor (a) convencional (b) perfilado modificado

Tabla 28. Identificación y dimensiones de rotores propuestos

Geometría	ID	Tipo Turbina	Np	D (m)	De (m)	d (m)	z (m)	e	h
Rotor convencional	RC	Savonius	0	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	-
Rotor perfilado	RP	Savonius	0	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	-
Convencional un cuarto de pala D/20	1CRCD/20	Savonius	1	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Convencional un cuarto de pala D/45	1CRCD/45	Savonius	1	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45
Convencional dos cuartos de pala D/20	2CRCD/20	Savonius	2	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Convencional dos cuartos de pala D/45	2CRCD/45	Savonius	2	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45
Convencional tres cuartos de pala D/20	3CRCD/20	Savonius	3	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Convencional tres cuartos de pala D/45	3CRCD/45	Savonius	3	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45
Perfilado un cuarto de pala D/20	1CRPD/20	Savonius	1	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Perfilado un cuarto de pala D/45	1CRPD/45	Savonius	1	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45
Perfilado dos cuartos de pala D/20	2CRPD/20	Savonius	2	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Perfilado dos cuartos de pala D/45	2CRPD/45	Savonius	2	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45
Perfilado tres cuartos de pala D/20	3CRPD/20	Savonius	3	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/20
Perfilado tres cuartos de pala D/45	3CRPD/45	Savonius	3	0,925	1,0175	0,5	0,002	0,15	D/45

Número de cuartos de pala ( $N_p$ ); Diámetro rotor ( $D$ ); Diámetro placa ( $D_e$ ); Longitud de la cuerda ( $d$ ); Grosor pala ( $z$ ); Relación de superposición ( $e$ ); Espaciamiento entre palas ( $h$ )

Diversos autores han demostrado una relación óptima de superposición,  $e$ , a 0,15 para aumentar el rendimiento del rotor [47, 57, 63, 64, 66, 70]. Por lo tanto, se decidió adoptar un valor de  $e = s/d = 0,15$  para todas las configuraciones. Se asumió una altura de unidad ( $H = 1$ ). A partir del estudio desarrollado por Sharma y Sharma, 201 [52], donde se evidenció un efecto positivo en el rendimiento de turbinas Savonius, al adicionar dos cuchillas de cuarto de pala al rotor clásico. Se identificó que, durante la investigación, no se indagó sobre la influencia de variar el número de cuarto de pala y su espaciamiento entre sí. En consecuencia, se propuso un total de 13 nuevas configuraciones con variación de número de cuartos de palas (uno, dos y tres) y espaciamientos ( $D/20$  y  $D/45$ ) para un perfil Savonius convencional y uno perfilado Figura 48, luego se compararon con un rotor Savonius convencional validado para identificar posibles mejoras en rendimiento. Se consideró un espaciamiento de  $D/90$  pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, por lo tanto, se decidió no tenerlo en cuenta para este estudio.

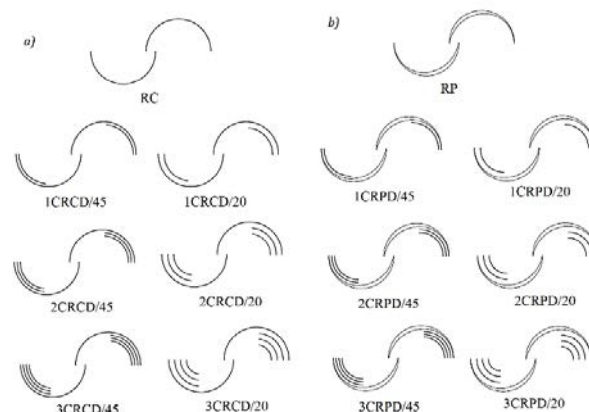


Figura 48. Configuraciones propuestas

### 2.3 Dominio computacional y condiciones de borde

Es importante mencionar que, inicialmente, se implementó un enfoque 3D en Ansys CFX que requería una gran cantidad de recursos computacionales y tiempos de resolución significativos. En respuesta, dado que esta investigación desea centrarse en detalles clave del modelado en lugar de invertir extensas sesiones de tiempo para resolver geometrías complejas, se decidió abordar el problema a través de una solución 2D. En respuesta a lo anterior, un modelo numérico de dos dimensiones es desarrollado usando Ansys Fluent, teniendo en cuenta que varios autores han comprobado que Fluent trabaja mejor con este tipo de aproximaciones que CFX para resolver escenarios bajo turbulencia a través de una geometría específica [46,50,56,66,71].

Un dominio computacional no debería ser más grande de lo necesario, que evite contar con elementos de exceso en la malla e invertir tiempo y recurso computacional no requerido. El dominio precisa ser lo suficientemente amplio como para tolerar y reproducir tanto el efecto de estela como el flujo alrededor de la turbina [64,72,73]. Este modelo hospeda dos dominios diferentes, separados por una interface definida como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El primero mantiene un estado estacionario que se extiende desde la frontera del subdominio hasta los muros límites, asemejando un túnel de viento. En contraste, el segundo dominio, que hace de subdominio, sigue un patrón rotativo dentro de una circular virtual que contiene la representación del rotor. Este espacio rotacional debe asegurar que los fenómenos de vórtice cercanos a la turbina se puedan desentrañar dentro de este subdominio para reducir los errores de las transiciones de flujo sobre la interfaz [74]. El subdominio puede rotar en diferentes valores de revolución [65].

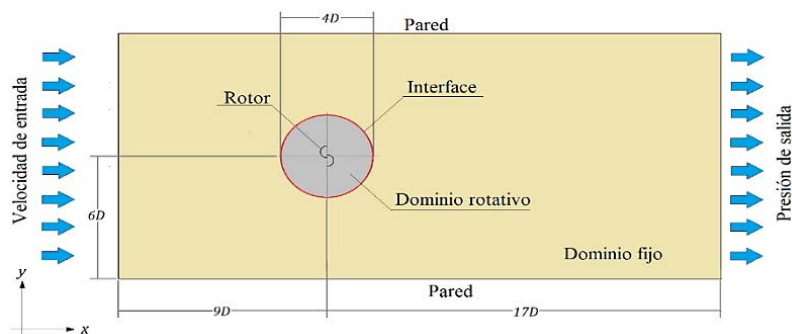


Figura 49. Dominio computacional y condiciones de borde

Diferentes investigaciones han realizado estudios de sensibilidad para determinar la idoneidad en el tamaño del dominio computacional, obteniendo variaciones en sus hallazgos, pero no lejanas. La literatura sugiere una distancia mínima de  $6D$  a barlovento del rotor, siendo  $D$  el diámetro del rotor [65,66,69]. La distancia a sotavento del rotor se recomienda no sea inferior a  $15D$  [66,69,73], ya que se requiere un desarrollo completo de la estela [48]; se considera pertinente un rango de distancia desde  $4D$  hasta  $10D$  entre el límite superior e inferior del dominio [65,66,69]. Con respecto al dominio giratorio, se recomienda un radio dentro de un rango de  $2D$  a  $4D$  [65,66,74]. El presente estudio adopta las siguientes distancias para el dominio computacional planteado con base en Ferrari et al. 2017 [69], ver Figura 49. a)  $9D$  a sotavento del rotor. b)  $17D$  a barlovento del rotor. c)  $6D$  desde el límite inferior hasta el superior. d) Con un radio de  $4D$  para el dominio rotativo. Condiciones de borde aplicadas en esta investigación:

1. Entrada: Velocidad constante de viento ( $U$ ) igual a  $5m/s$  a dirección constante sobre el eje X.
2. Salida: Presión estática.
3. Presión relativa atmosférica establecida igual a  $0Pa$ .
4. *Stationary wall condition* es impuesto a los bordes inferior y superior con esfuerzo cortante 0.
5. Se aplica la condición de muro no deslizante "*No slip wall condition*" a la superficie de las palas.
6. Resistencia del eje de rotor no es considerada.
7. Flujo vertical es descartado.
8. Velocidad angular del rotor ( $\Omega$ ) es fijada a  $1^\circ$  por paso.

### 2.4 Proceso de enmallado

Teniendo en cuenta la naturaleza de este estudio, es necesario alcanzar una solución adecuada a la capa límite del rotor para resolver la región de transición. En consecuencia, se crea una malla no estructurada para la interface de rotación que mejore la adaptación a la geometría del rotor; por otro lado, la interfaz fija presenta una malla estructurada para obtener una mayor organización y reducción de los efectos de difusión numérica [75, 76]. Además de generar una malla suficientemente fina en las paredes del rotor, se debería calcular un factor gobernante adimensional ( $y^+$ ) para apropiadamente estimar la distancia del primer nodo de la malla desde el muro del rotor. El procedimiento de cálculo se basó en [52, 75], de donde se obtuvo la Ecuación 1, empleada para determinar  $y^+$ .

Un deseable  $y^+ \approx 1$  se destina a este trabajo, esperando resolver la subcapa viscosa en la capa límite turbulenta para mejores soluciones en cercanía al muro de capa límite [54, 63, 64, 69, 76–78]. Se fijó un monitor para rastrear el valor de  $y^+$  en cada ejecución y así confirmar que se obtengan los valores esperados (ecuación (1)).

$$y^+ = \frac{\rho U_t y}{\mu} \quad (1)$$

Donde,  $y^+$  es un parámetro adimensional,  $U_t$  es la velocidad de la fricción,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\mu$  es la viscosidad del fluido y  $y$  es la distancia desde el muro hasta el primer nodo. La ecuación (2) permite hallar  $U_t$ :

$$U_t = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} = U \sqrt{\frac{C'_f}{2}} \quad (2)$$

Donde,  $\tau_\omega$  es el esfuerzo cortante en la pared y  $C'_f$  es el coeficiente de fricción que se puede obtener a partir de la ecuación (3).

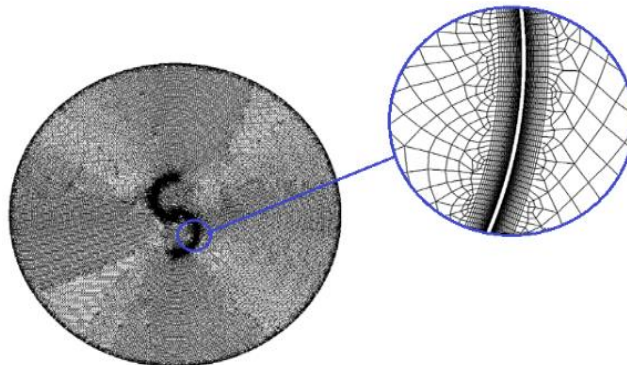
$$\frac{C'_f}{2} \approx \frac{0.037}{Re_L^{1/5}} \quad (3)$$

Inicialmente, tres diferentes mallas (Tabla 29) fueron creadas con la herramienta “*Meshing*” del programa Ansys- CFD para evaluar su pertinencia en relación con el objeto del estudio. Para validar las mallas y posteriormente compararlas, se dibujó un rotor convencional tipo Savonius con base en el propuesto por Ferrari et al. [69]. Como una condición para asegurar todas las soluciones convergerían, se establecen 3600 pasos para cada simulación, equivalentes a 10 vueltas completas.

**Tabla 29.** Análisis de malla

	Celdas	TSR	$C_m$	$C_p$	%error	Cd	%error	$C_t$	%error
[69]	578575	0.81	0.311	0.252	-	1.143	-	-1.059	-
Gruesa	45707	0.81	0.325	0.263	4.39%	1.176	2.89%	-1.079	1.93%
Media	73740	0.81	0.321	0.260	3.30%	1.178	3.08%	-1.067	0.76%
Fina	152871	0.81	0.322	0.261	3.68%	1.160	1.52%	-1.052	0.68%

Dado que la variación del porcentaje de error no es significativa, menos del 5%, se decidió adoptar la malla gruesa para este trabajo con la intención de ahorrar recursos computacionales y tiempo de simulación. Se aplicó un nivel de inflación o “*inflation*”, como se encuentra en el programa Ansys, de 16 con una tasa de crecimiento de 1.1 [52,79]. La Figura 504 presenta la malla generada y seleccionada para la investigación.



**Figura 50.** Malla gruesa seleccionada en dominio rotacional

## 2.5 Parámetros de rendimiento

El rendimiento de la turbina se analizó obteniendo el coeficiente de torque ( $C_m$ ) (ecuación (4)) [80] y el coeficiente de desempeño ( $C_p$ ) (ecuación (5)) [69] para todos los escenarios formulados. Se aplicó un monitor en Ansys Fluent para monitorear los valores  $C_m$  y  $C_p$ . La intensidad de turbulencia baja se fijó en 1% [74].

$$C_m = \frac{T}{0.5\rho AU^2 R} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{T\Omega}{0.5\rho AU^3} \quad (5)$$

Donde,  $P_o$  es la potencia de salida de la turbina,  $P_i$  es la potencia de entrada del viento,  $T$  es la dinámica del torque,  $A$  es el área de barrido y  $R$  es el radio de la turbina.

## 2.6 Modelo de turbulencia

El método de volúmenes finitos se usó para resolver las ecuaciones de conservación de flujo de aire turbulento alrededor de la superficie del rotor, lo que permite calcular  $C_p$ . Para tal efecto, un modelo tipo *RANS* (*Reynolds*

*Averaged Navier Stokes*) de dos ecuaciones es requerido. El modelo *SST (Shear Stress Transport) k- $\omega$*  según sus siglas en inglés fue seleccionado, ya que este ha sido exitosamente utilizado por diferentes autores que comprobaron es un modelo adecuado para obtener alta precisión de borde, gracias al tratamiento avanzado en condiciones cerca al muro que permite el modelo [57, 65, 69, 81, 82] Además, *SST k -  $\omega$*  requiere menos recurso computacional, sin perder precisión en la solución, comparado a otros complejos modelos que trabajan con condiciones de turbulencia [54, 63, 78].

Al introducir la ecuación de momento de Reynolds (ecuación (6)), el término de tensión de estrés de Reynolds bajo estado turbulento ( $\tau_{ij}$ ) (ecuación (7)) se destaca por traer incógnitas en respuesta al proceso de promediado, generando una necesidad implícita de modelar el problema hasta que sistema de la ecuación de gobierno se puede cerrar [75, 83]. Donde,  $\bar{u}_i$  es la velocidad promedio del aire,  $x$  es la dirección del viento,  $\bar{p}$  es el promedio de la presión,  $t$  es el tiempo y  $\mu$  viscosidad dinámica del aire.

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (7)$$

Donde,  $u'_i$  es la oscilación de la velocidad para efectos turbulentos. El cierre para el problema del modelo *RANS* se obtiene usando la hipótesis de Boussinesq, expresada en la ecuación (8), que usa la Viscosidad de Eddy ( $\mu_T$ ) que permite modelar el  $\tau_{ij}$  [75, 84–86].

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (8)$$

Donde,  $\delta_{ij}$  es el operador delta de Kronecker. Para el modelo *SST k -  $\omega$* ,  $\mu_T$  puede calcularse aplicando la ecuación (9), que resuelve la ecuación de transporte para  $k$ , la energía cinética turbulenta específica y  $\omega$ , que es la frecuencia de turbulencia.

$$\mu_T = f \left( \frac{\rho k}{\omega} \right) \quad (9)$$

Las ecuaciones resultantes para  $k$  y  $\omega$  que componen el combinado modelo *SST k -  $\omega$*  son la ecuación (10) y la ecuación (11) respectivamente [75, 86].

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (11)$$

Donde,  $\beta^*$  es una constante de turbulencia,  $\sigma_k$  y  $\sigma_\omega$  son números de Schmidt,  $\gamma$  es un coeficiente del modelo combinado,  $v_t$  representa la difusividad de turbulencia y  $F_1$  es un coeficiente de función. Siguiendo la ecuación (12) y la ecuación (13), se puede encontrar  $F_1$  que posteriormente permite calcular los coeficientes  $\phi_1$  y  $\phi_2$  en el modelo.

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (12)$$

$$\phi = \beta, \sigma_k, \sigma_\omega, \gamma \quad (13)$$

Donde  $\beta$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$  y  $\gamma$  son constantes de turbulencia y sus valores son [86].

$\beta_1 = 0.075$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\beta^* = 0.09$ ,  $\sigma_{k1} = 1.176$ ,  $\sigma_{k2} = 1$ ,  $k = 0.41$ ,  $\sigma_{\omega1} = 2$ ,  $\sigma_{\omega2} = 1.168006$  y  $\gamma = 0.5532$

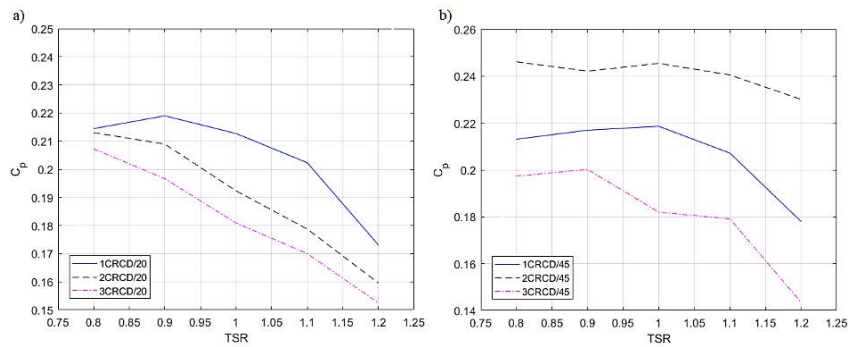
Por medio de la ecuación (14), se puede calcular la función  $F_1$ .

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (14)$$

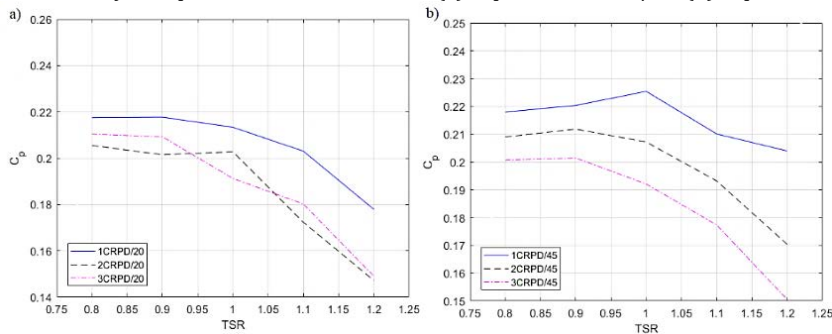
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Comparación de geometrías. Análisis de torque y potencia

Con el objetivo de comparar y determinar qué configuración presenta el mejor rendimiento, se completó un análisis 2D en estado de transición para todas las configuraciones (Figura 48). En primer lugar, se realizó una comparación entre los diferentes números de palas tanto para la configuración convencional como para la configuración perfilada. Estas pruebas fueron realizadas para valores de *TSR* desde 0.80 hasta 1.20 aumentando dicho valor en 0.10. En total, se realizaron ocho corridas para cada escenario planteado. De la Figura 51, es posible afirmar que la configuración 1CRCD/20 y 2CRCD/45 presentan en general valores más altos de  $C_p$ , mientras que en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los escenarios con mayor rendimiento a diferentes *TSRs* son 1CRPD/20 y 1CRPD/45. Estos son resultados importantes ya que permiten afirmar que no necesariamente un mayor número de palas involucra mayor eficiencia, además, que el espaciamiento entre palas juega un papel importante en la reducción o incremento del  $C_p$ .



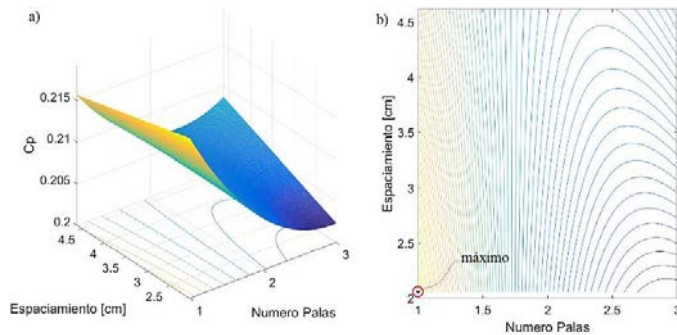
**Figura 51.** Una, dos y tres palas rotor convencional (a) espaciamiento D/20 (b) espaciamiento D/45



**Figura 52.** Una, dos y tres palas rotor perfilado (a) espaciamiento D/20 (b) espaciamiento D/45

Con el fin de determinar de manera categórica los escenarios que reflejen las eficiencias más altas, se realizó un diseño experimental factorial multinivel como se puede observar en la

Tabla 30. El diseño, consta de dos factores: el número de palas, el cual cuenta con tres niveles (una, dos y tres palas) y los espaciamientos entre las mismas que, como se ha mencionado anteriormente, son de D/45 (2,056cm) y D/20 (4,625cm). Como herramienta para realizar el análisis estadístico y obtener las superficies de respuesta, se utilizó el software estadístico STATGRAPHICS Centurion, El análisis apuntó a maximizar el valor de  $C_p$  a una TSR de 0.80. La Figura 53 soporta la superficie de respuesta para el rotor convencional y la Figura 53. Superficie de respuesta para rotor convencional TSR=0.8 (a) superficie (b) contornos

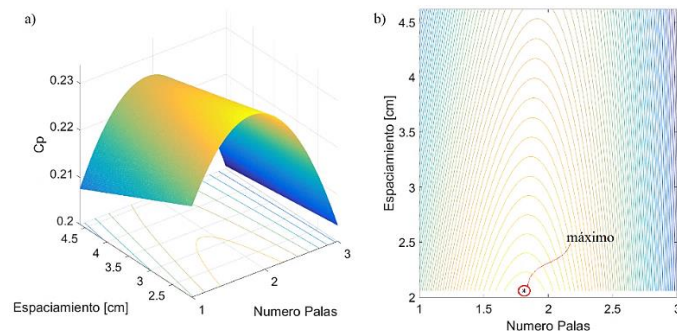


**Figura 54** la del rotor perfilado.

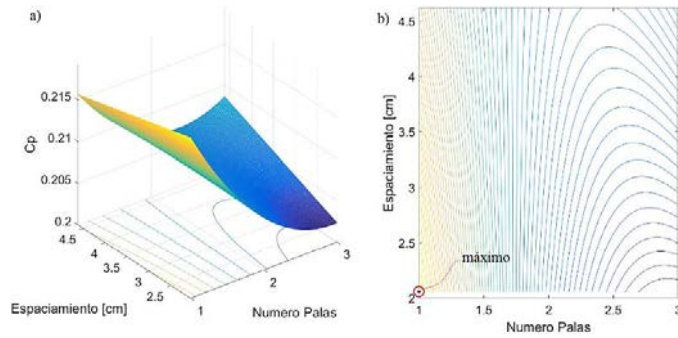
**Tabla 30.** Diseño factorial planteado

Factores	Niveles		
Numero de palas	1	2	3
Espaciamiento	D/45 (2,056cm)	D/20 (4,625cm)	---

\*Variables de respuesta:  $C_{pConvencional}$  Y  $C_{pPerfil}$

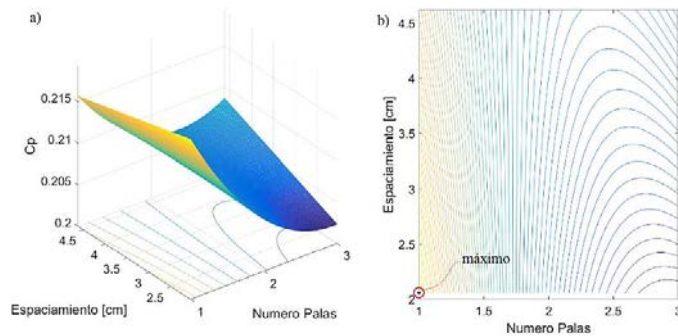


**Figura 53.** Superficie de respuesta para rotor convencional TSR=0.8 (a) superficie (b) contornos



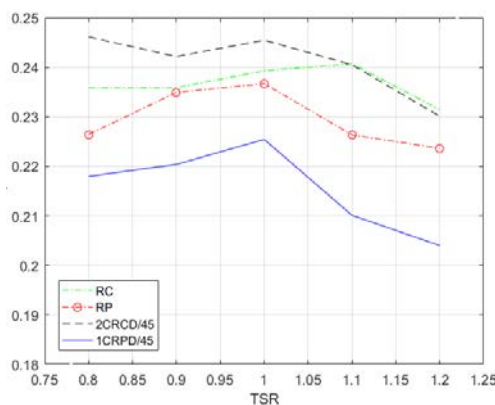
**Figura 54.** Superficie de respuesta para rotor perfilado TSR=0.8 (a) superficie (b)contornos

De acuerdo con la Figura 53, es posible afirmar que el escenario que presenta un valor más alto de  $C_p$  es a un espaciamiento de 2.056cm (es decir D/45) y con un número de cuartos de pala aproximadamente de 2 (se debe aproximar por tratarse de un número que solo puede ser entero), mientras que la Figura 53. Superficie de respuesta para rotor convencional TSR=0.8 (a) superficie (b)contornos



**Figura 54** el máximo  $C_p$  se obtiene con una pala a 2.056 cm de espaciamiento. Dicho de otra manera, los mejores escenarios que se obtuvieron de las superficies de respuesta fueron 2CRCD/45 y 1CRPD/45. Los valores de  $C_p$  que se obtuvieron de dichos escenarios se graficaron y se comparan con el rotor convencional y el rotor perfilado (ver Figura 47).

En la Figura 55, es posible observar que la configuración 2CRCD/45 es la que presenta una tendencia más alta y por lo tanto valores de  $C_p$  más altos. Para ser más precisos, la Tabla 31 muestra las diferencias porcentuales respecto al rotor convencional de los diferentes escenarios propuestos, donde los valores negativos muestran una disminución en la eficiencia mientras que los valores positivos reflejan un aumento de la misma. El escenario 2CRCD/45 es el único escenario con un aumento en el rendimiento de más del 4%, siendo un incremento significativo con un  $C_{p-maximo} = 0.246$  a una  $TSR = 0.8$ .

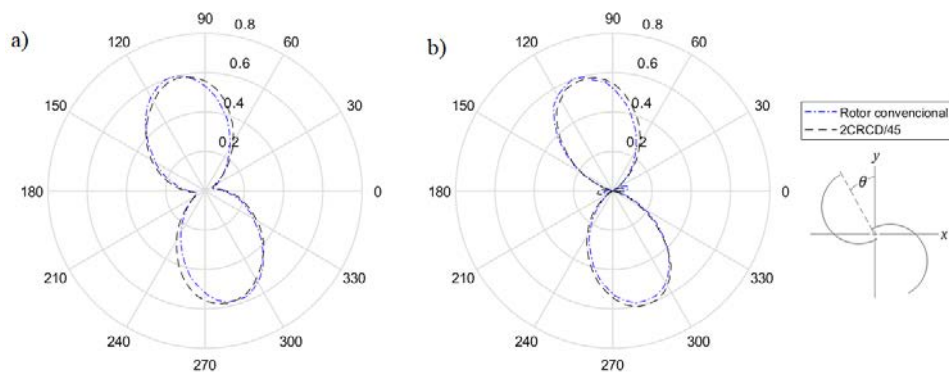


**Figura 55.** Comparación de escenarios de mayor rendimiento

**Tabla 31.** Diferencias porcentuales en el valor de  $C_p$  a diferentes TSR

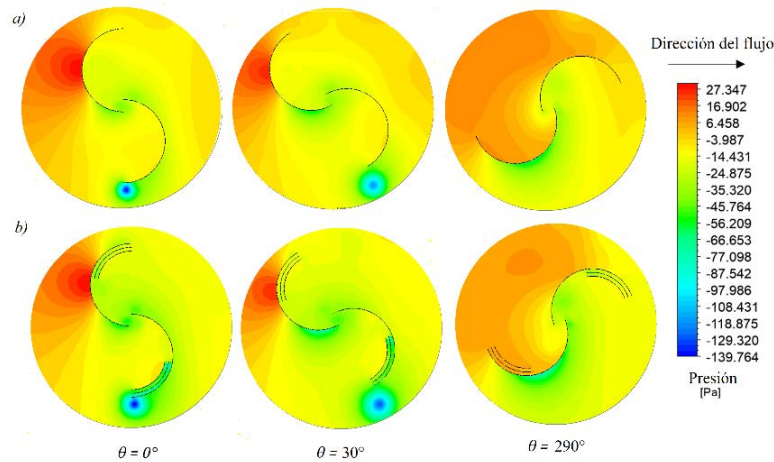
TSR	RP	1CRPD/45	2CRCD/45
0.80	-3.99	-7.57	4.35
0.90	-0.40	-6.57	2.67
1.00	-1.09	-5.79	2.58
1.10	-5.97	-12.71	-0.09
1.20	-3.37	-11.86	-0.59

A continuación, la Figura 56 presenta las cartas polares del coeficiente de torque ( $C_m$ ) tanto para el mejor escenario encontrado como para el rotor convencional.

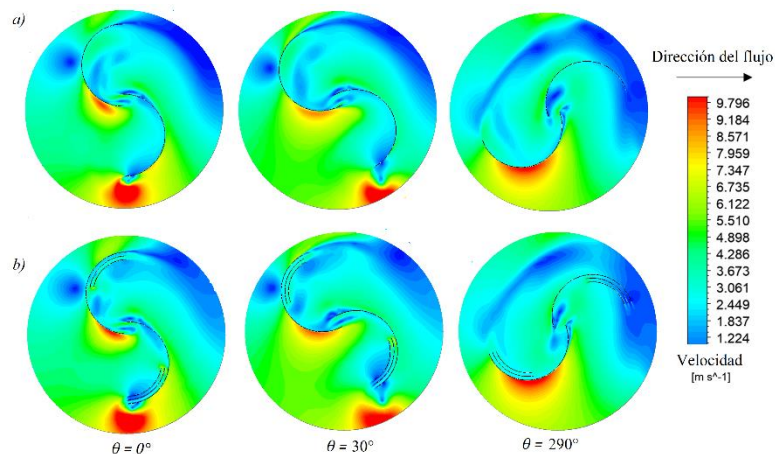


**Figura 56.** Cartas polares de  $C_m$  (a) TSR = 0.8 b) TSR = 1.0

Como era de esperarse, según los resultados de la Figura 55 y la Tabla 31, la configuración 2CRCD/45 opera en general a valores de torque más altos. A ángulos aproximados de  $110^\circ$  y  $290^\circ$  es posible encontrar los valores máximos, mientras que los torques mínimos se encuentran a aproximadamente  $210^\circ$  y  $30^\circ$  (todos los ángulos medidos en dirección contraria a las manecillas del reloj a partir del eje  $y$ ). Por lo tanto, los ángulos de  $30^\circ$  y  $290^\circ$  se seleccionaron para mostrar los contornos de presiones (Figura 57) y contornos de velocidades (Figura 58). En la Figura 57, se pueden distinguir zonas de alta y baja presión. Esto se puede evidenciar a  $0^\circ$  y  $30^\circ$  donde zonas de alta presión se forman en la parte convexa de la pala (mostrada en color rojo) y zonas de baja presión se ubican cerca de la punta de la pala (mostrada en color azul en la pala inferior). En estas zonas, como se observa en la Figura 58, son zonas de alta presión que coinciden con zonas de alta velocidad y viceversa.



**Figura 57.** Contornos de presiones (a) Rotor convencional, (b) configuración 2CRCD/45



**Figura 58.** Contornos de velocidades (a) Rotor convencional, (b) configuración 2CRCD/45

### 3.2 Generación energética y reducción de GEI

Una vez establecido que 2CRCD/45 presenta el mayor rendimiento con un  $C_p$  de 0.246 a una TSR=0.8, se procedió a estimar la generación energética teórica (Ecuación (15)) con  $U=5\text{m/s}$ . Como resultado se obtuvo una potencia de 17.42W, suficiente para suplir la HHLd de 15W reportada en la sección uno (1). La generación potencial diaria de toda la comunidad sería de 16kWh.



$$P_o = T \cdot \Omega \quad (15)$$

Para determinar la potencial reducción anual de GEI por uso de energías renovables en la comunidad (132 viviendas), se aplicó un factor de emisión por *kWh* de electricidad comprada en el área de influencia igual a  $0.181 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$  [87]. Como resultado se obtuvo una potencial reducción anual de  $1063.5 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó un estudio numérico para analizar el efecto sobre el rendimiento en turbinas tipo Savonius cuando se realizan modificaciones específicas a la configuración clásica (Figura 48). Se utilizó el programa Ansys Fluent para llevar a cabo la simulación numérica 2D en estado transitorio empleando el modelo *SST k -  $\omega$* . Un análisis de convergencia de malla para lograr una independencia de red y optimizar el uso de recursos computacionales fue aplicado. Durante el proceso de mallado, el primer valor de espesor de capa (cerca de las cuchillas) se calculó y monitoreó para todas las simulaciones, obteniendo un  $y^+ \approx 1$ .

Se identificó con éxito una nueva configuración (2CRCD / 45) a partir del convencional rotor Savonius, con una considerable mejoría en rendimiento mayor al 4%. Esto demuestra que sí es posible mejorar significativamente la eficiencia de las turbinas tipo Savonius sin necesidad de cambios complejos y costosos.

Además, como resultado de las superficies de respuestas obtenidas, se corroboró que la mejor configuración efectivamente es 2CRCD/45, la cual es la única que sobrepasa (en varios puntos) al rotor convencional. Sin embargo, es necesario aclarar que esta configuración es la mejor dentro del rango de datos probados. Se hace necesario realizar más pruebas con el fin de optimizar el espaciamiento y el número de cuartos de pala empleados. En otras palabras, es posible que exista una configuración por fuera del diseño factorial planteado que presente un mejor desempeño.

La turbina modificada tipo Savonius es una solución potencial para generar electricidad a baja escala como respuesta a los problemas asociados con la falta de electricidad en algunas zonas remotas de Colombia. Esta alternativa puede ser adoptada por el gobierno colombiano para garantizar el servicio de electricidad a comunidades vulnerables como el RI-EC, durante el posconflicto. Es importante mencionar que la generación teórica de las turbinas logra suplir la demanda de iluminación presentada. En consecuencia, se lograría una reducción anual de GEI estimada de  $1084.75 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ .

Un adecuado y viable proyecto debería ser replicable en cualquier país en desarrollo donde existan comunidades vulnerables sin acceso a la red eléctrica nacional, contribuyendo a impulsar la investigación de tecnologías energéticas sostenibles como un paso inicial para mejorar los niveles de bienestar de las personas objeto.

## REFERENCIAS

- [1] Caiado, R. et al. (2017). Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 165, 890–904.
- [2] Ekanayake, P., Moriarty, P. & Honnery, D. (2015). Equity and energy in global solutions to climate change. *Energy for Sustainable Development* 26, 72–78.
- [3] Fleming, A. et al. (2017). The sustainable development goals: A case study. *Marine Policy* 86, 94–103.
- [4] Kovacic, Z. & Salazar, O.V. (2017). The lose-lose predicament of deforestation through subsistence farming: Unpacking agricultural expansion in the Ecuadorian Amazon. *Journal of Rural Studies* 51, 105–114.
- [5] Armenteras, D. et al. (2017). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change* 46, 139–147.
- [6] Faria, W. & Almeida, A. (2016). Relationship between openness to trade and deforestation: Empirical evidence from the Brazilian Amazon. *Ecological Economics* 121, 85–97.
- [7] Castro, A. et al. (2017). Land related grievances shape tropical forest-cover in areas affected by armed-conflict. *Applied Geography* 85, 39–50.
- [8] Finnegan, W. et al. (2017). Global warming potential associated with dairy products in the Republic of Ireland. *Journal of Cleaner Production* 163, 262–273.
- [9] Prasad, P., Thomas, J. & Narayanan, S. (2017). Global Warming Effects. In: B. Thomas, B. Murray & D. Murphy (Eds.), *Encycl. Appl. Plant Sci.* (289–299). Oxford Press.
- [10] Zucali, M. et al. (2017). Global warming and mitigation potential of milk and meat production in Lombardy (Italy). *Journal of Cleaner Production* 153, 474–482.
- [11] Sierra, C. et al. (2017). Monitoring ecological change during rapid socio-economic and political transitions: Colombian ecosystems in the post-conflict era. *Environmental Science and Policy* 76, 40–49.
- [12] Bilton, P. et al. (2017). Classification trees for poverty mapping. *Computational Statistics & Data Analysis* 115, 53–66.
- [13] Churchill, S. & Smyth, R. (2017). Ethnic Diversity and Poverty. *World Development* 95, 285–302.
- [14] United Nations Development Programme. [Sustainable Development Goals](#). Online [Oct 2017].
- [15] Munro, P., van der Horst, G. & Healy, S. (2017). Energy justice for all: Rethinking Sustainable Development Goal 7 through struggles over traditional energy practices in Sierra Leone. *Energy Policy* 105, 635–641.
- [16] United Nations General Assembly (2015). [Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development](#). Online [Oct 2017].
- [17] Schwerhoff, G. & Sy, M. (2017). Financing renewable energy in Africa – Key challenge of the sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 393–401.
- [18] Heffron, R. & McCauley, D. (2014). Achieving sustainable supply chains through energy justice. *Applied Energy* 123, 435–437.
- [19] Heffron, R. & McCauley, D. (2017). The concept of energy justice across the disciplines. *Energy Policy* 105, 658–667.
- [20] Islar, M., Brogaard, S. & Lemberg, M. (2017). Feasibility of energy justice: Exploring national and local efforts for energy development in Nepal. *Energy Policy* 105, 668–676.
- [21] Jenkins, K. et al. (2016). Energy justice: A conceptual review. *Energy Research & Social Science* 11, 174–182.
- [22] Ariza, Y. & Boada, S. (2017). Education and Sensitization on Violence: Seeking to Understand the Victims of the Colombian Armed Conflict. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 237, 562–567.
- [23] Aparicio, J. (2017). Affective capitalism, humanitarianism and extractivism in Colombia: old and new borders for future times. *Cultural Studies* 31(2–3), 331–352.
- [24] Sliwa, M. & Wiig, H. (2016). Should I stay or should I go: The role of Colombian free urban housing projects in IDP return to the countryside. *Habitat International* 56, 11–19.
- [25] De Pourcq, K. et al. (2017). Understanding and Resolving Conflict Between Local Communities and Conservation Authorities in Colombia. *World Development* 93, 125–135.
- [26] The Office of the High Commissioner for Peace (2016). [The Colombian Peace Agreement. The opportunity to build peace](#). Online [Nov 2017].
- [27] Nussio, E. (2013). [Desarme, desmovilización y reintegración de excombatientes: políticas y actores del postconflicto](#). Online [Nov 2017].
- [28] Cano, M. et al. (2016). [External evaluation of the joint unhcr - undp program “transitional solutions initiative - tsi](#). Online [Nov 2017].
- [29] Contreras, J. & Rodríguez, Y. (2016). Incentives for wind power investment in Colombia. *Renewable Energy* 87, 279–288.
- [30] UNHCR-ACNUR (2016). [TSI a través de los ojos de la comunidad Resguardo Eden - Ricaurte](#). Online [Nov 2017].
- [31] PNUD & UNHCR (2015). [Proceso de Reubicación. Resguardo Integrado Edén Cartagena. Ricaurte Nariño. Construyendo soluciones sostenibles](#). Online [Nov 2017].
- [32] Observatorio del Programa Presidencial de DH y DIH (2010). [Diagnóstico de la situación del pueblo indígena Awá](#). Online [Nov 2017].
- [33] IDEAM (2014). [Promedio de número de días al mes sin brillo solar enero](#). Online [Oct 2017].
- [34] IDEAM (2014). [Mapa Irradiación global horizontal medio diario - Anual](#). Online [Oct 2017].
- [35] Sánchez, C. et al. (2005). Atlas de radiación solar de Colombia. Himat.
- [36] Ministerio de Minas y Energía. (2006). Apéndice A. Atlas De Radiación Solar De Colombia. Himat.
- [37] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (1999). Régimen anual de viento. Programa de Meteorología Aeronáutica. Himat.
- [38] Stackhouse, P. (2016). [NASA Surface meteorology and Solar Energy](#). Online [Nov 2017].
- [39] Anyi, M. & Kirke, B. (2010). [Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities](#). *Energy for Sustainable Development* 14(2), 110–116.
- [40] Driss, Z., Damak, A. & Salah, M. (2015). Evaluation of the Savonius Wind Rotor Performance for Different External Overlap Ratios. *International Journal of Fluid Mechanics & Thermal Sciences* 1(1), 14–21.

- [41] Jeon, K. et al. (2015). Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy* 79(1), 167–176.
- [42] Lee, K. et al. (2017). Influence of the vertical wind and wind direction on the power output of a small vertical-axis wind turbine installed on the rooftop of a building. *Applied Energy* 5, 0–1.
- [43] Rodriguez, O., del Río, J. & Jaramillo, O. (2016). The importance of mean time in power resource assessment for small wind turbine applications. *Energy for Sustainable Development* 30, 32–38.
- [44] Wang, L., Liu, X. & Kolios, A. (2016). State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, 195–210.
- [45] Akwa, J., Vielmo, H. & Petry, A. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5), 3054–3064.
- [46] El-Baz, A., Youssef, K. & Mohamed, M. (2015). Innovative improvement of a drag wind turbine performance. *Renewable Energy* 86, 89–98.
- [47] Driss, Z. et al. (2016). Study of the incidence angle effect on the aerodynamic structure characteristics of an incurred Savonius wind rotor placed in a wind tunnel. *Energy* 113, 894–908.
- [48] Ghasemian, M., Ashrafi, Z. & Sedaghat, A. (2017). A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 149, 87–100.
- [49] Kang, C., Liu, H. & Yang, X. (2014). Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33, 499–508.
- [50] Kumar, A. & Saini, R.P. (2015). Investigation on performance of improved savonius rotor: An overview. In *International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering*.
- [51] Roy, S. & Saha, U. (2015). Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy* 137, 117–125.
- [52] Sharma, S. & Sharma, R. (2016). Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation. *Energy Conversion and Management* 127, 43–54.
- [53] Saha, U., Thotla, S. & Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(8–9), 1359–1375.
- [54] Tartuferi, M. et al. (2015). Enhancement of savonius wind rotor aerodynamic performance: A computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy* 79, 371–384.
- [55] Lee, J., Lee, Y. & Lim, H. (2016). Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable Energy* 89, 231–244.
- [56] Roy, S. & Saha, U. (2013). Computational study to assess the influence of overlap ratio on static torque characteristics of a vertical axis wind turbine. *Procedia Engineering* 51, 694–702.
- [57] Akwa, J. et al. (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy* 38(1), 141–149.
- [58] Gabitov, T. et al. (2014). Sustainable Development as a Priority of Contemporary Cultural Policy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 140, 691–694.
- [59] Jimenez, M., Franco, C. & Dynner, I. (2016). Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia. *Energy* 111, 818–829.
- [60] Ostos, I. et al. (2016). Sistema híbrido fotovoltaico (FV) con interacción a la red para zonas rurales de Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental* 8(1), 169–182.
- [61] Zuluaga, M. & Dynner, I. (2007). Incentives for renewable energy in reformed Latin-American electricity markets: The Colombian case. *Journal of Cleaner Production* 15(2), 153–162.
- [62] Alaimo, A. et al. (2015). 3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine. *Energies* 8(4), 3013–3033.
- [63] Kacprzak, K., Liskiewicz, G. & Sobczak, K. (2013). Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy* 60, 578–585.
- [64] Shaheen, M., El-Sayed, M. & Abdallah, S. (2015). Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 137, 78–89.
- [65] Nasef, M. et al. (2013). Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 123, 1–11.
- [66] Sanusi, A. et al. (2017). Performance analysis of a combined blade savonius wind turbines. *International Journal of Fluid Machinery and Systems* 10(1), 54–62.
- [67] Sarma, N., Biswas, A. & Misra, R. (2014). Experimental and computational evaluation of Savonius hydrokinetic turbine for low velocity condition with comparison to Savonius wind turbine at the same input power. *Energy Conversion and Management* 83, 88–98.
- [68] Tahani, M. & Moradi, M. (2016). Aerodynamic investigation of a wind turbine using CFD and modified BEM methods. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 9(1), 107–111.
- [69] Ferrari, G. et al. (2017). CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy* 105, 722–734.
- [70] El-Askary, W. et al. (2015). Harvesting wind energy for improving performance of savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 139, 8–15.
- [71] Kumar, A. & Saini, R. (2017). Performance analysis of a single stage modified Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades. *Renewable Energy* 113, 461–478.
- [72] Dragomirescu, A. (2011). Performance assessment of a small wind turbine with cross flow runner by numerical simulations. *Renewable Energy* 36(3), 957–965.
- [73] Mohamed, M. et al. (2011). Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Conversion and Management* 52, 236–242.
- [74] Kacprzak, K. & Sobczak, K. (2014). Numerical analysis of the flow around the Bach-type Savonius wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series* 530(1), 1–9.
- [75] Fluent, I. (2006). *Modeling Turbulent Flows*. ANSYS.Inc.

- [76] Ariff, M., Salim, S. & Cheah, S. (2009). Wall Y + Approach for Dealing With Turbulent Flow Over a Surface Mounted Cube: Part 1 – Low Reynolds Number. In: Seventh Int. Conf. CFD Miner.
- [77] Tu, J., Yeoh, G. & Liu, C. (2018). Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Elsevier.
- [78] Yu, H. & Thé, J. (2016). Validation and optimization of SST k- $\omega$  turbulence model for pollutant dispersion within a building array. *Atmospheric Environment* 145, 225–238.
- [79] Zhou, T. & Rempfer, D. (2013). Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines. *Renewable Energy* 51, 373–381.
- [80] Tahani, M. et al. (2017). Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability. *Energy* 130, 327–338.
- [81] Tian, W. et al. (2018). Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renewable Energy* 117, 287–299.
- [82] Zheng, M. et al. (2015). Effect of blade installation angle on power efficiency of resistance type VAWT by CFD study. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 6(1), 1–7.
- [83] Akwa, J. et al. (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy* 38(1), 141–149.
- [84] Rocha, P. et al. (2014). k- $\omega$  SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy* 65, 412–418.
- [85] Eça, L. & Hoekstra, M. (2011). Numerical aspects of including wall roughness effects in the SST k- $\omega$  eddy-viscosity turbulence model. *Computers & Fluids* 40(1), 299–314.
- [86] Shimura, T. et al. (2013). An evaluation of rans turbulence closure models for spilling breakers. In *Coastal engineering 2014*.
- [87] [Emission factors.com](http://Emissionfactors.com). Online [Nov 2017].

La alta complejidad de los flujos bifásicos hace que obtener una solución analítica de las ecuaciones gobernantes no sea posible. Principalmente porque estas ecuaciones son, en la mayoría de los casos, ecuaciones diferenciales parciales no lineales. Es allí donde el uso de los métodos numéricos implementados en software de mecánica de fluidos computacional CFD permiten predecir y estudiar los comportamientos de dichos flujos. En este trabajo fue usado el método de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones diferenciales asociadas al flujo anular. El método de volúmenes finitos divide el dominio computacional en pequeños volúmenes de control y resuelve las ecuaciones gobernantes para cada uno de esos volúmenes por aparte. Este trabajo tiene como fin predecir el comportamiento ondulado de la interfaz agua- aire en el flujo anular, para su posterior estudio y caracterización. Algunas características de interés son la amplitud de las ondas en la interfaz, la frecuencia, la longitud de onda, entre otras. Como caso de aplicación, se estudiará de manera preliminar la interfaz agua-aire usando un software de CFD como ambiente de simulación. El método de fluidos volumétrico (VOF - *volume of fluid method*) fue implementado para el análisis de la interface.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los flujos multifásicos aparecen en numerosos procesos naturales e industriales. Estos flujos están compuestos de dos o más fases en diferentes configuraciones geométricas o patrones de flujo. En particular, el patrón anular gas – líquido puede ser encontrado en la industria del petróleo para la producción y transporte de gas.

El patrón anular se caracteriza por un núcleo de gas, fluyendo por el centro de la tubería, a alta velocidad, una película de líquido que fluye alrededor de la pared del tubo y una interfaz entre las dos fases, con la velocidad superficial del gas mucho más alta que la velocidad superficial del líquido. En tubos verticales, la película de líquido tiene una espesura aproximadamente constante y en tubos horizontales e inclinados, la cantidad de líquido es mayor en la parte inferior de la tubería, debido a la fuerza gravitacional. El núcleo de gas habitualmente contiene gotas de líquido en suspensión y es la deposición de esas gotas de líquido en la pared superior del tubo que alimenta la película de líquido en esa parte del tubo [1].

Hay tres tipos principales de patrón anular. El primero ocurre cerca de la transición de flujo anular a *slug*, donde se presenta una película líquida irregular con ondas de gran amplitud en la interfaz entre los dos fluidos. El segundo tipo conocido como patrón anular "ideal" ocurre con bajo caudal de líquido y una velocidad del gas por encima de una velocidad mínima crítica. En este caso, las ondas en la interfaz son pequeñas y hay pocas gotas de líquido en el núcleo. El tercer tipo se presenta cuando se aumenta el caudal de líquido y se alcanza la velocidad crítica del gas, en este caso aparecen en la interfaz ondas llamadas de *Roll Waves* o *Disturbance Waves*.

El patrón anular es difícil de analizar porque hay que tener en cuenta un gran número de fuerzas dinámicas, por ejemplo: efectos viscosos e inerciales que son importantes dentro de la película líquida, como la tensión superficial que controla la estabilidad de la película en la interfaz. Entonces, con la excepción del flujo anular "ideal", no se han desarrollado soluciones analíticas que contengan todas las variables presentes. Para encontrar predicciones aproximadas se han desarrollado correlaciones empíricas para el factor de fricción en la interfaz, para el arrastre de líquido y la tasa de deposición [2].

En las últimas décadas ha crecido el interés en la investigación de flujos multifásicos en tubos debido a la frecuencia con que se presentan estos flujos. Sin embargo, hay aun algunos fenómenos relacionados al flujo anular en tubos que necesitan ser entendidos, como el arrastre de líquido. Esta investigación está enfocada en presentar y evaluar herramientas computacionales para predecir y estudiar el comportamiento de las ondas en la interfaz entre gas-líquido en flujos anulares.

## 2. MODELOS Y ESTUDIOS EXPERIMENTALES DESARROLLADOS PARA LA INTERFAZ ENTRE FASES

Como se mencionó anteriormente, la interfaz entre la película de líquido y el núcleo gaseoso es caracterizado por la presencia de ondas. Esas ondas son comúnmente clasificadas en dos tipos: "*Ripple Waves*" y "*Disturbance waves*", ver Figura 59. Las ondas *Ripple Waves* están caracterizadas por tener pequeñas amplitudes (comparadas con la espesura de la película), corta duración y generalmente no ocupan la circunferencia entera del tubo. Las *Disturbance Waves*

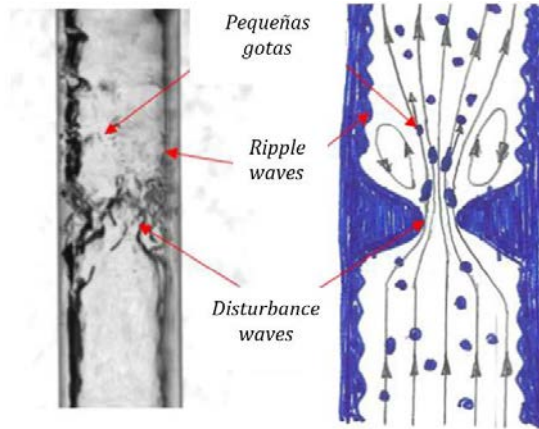
---

<sup>1</sup> abonillar@gmail.com

<sup>2</sup> ivanruizhidalgo@gmail.com

<sup>3</sup> iostos83@gmail.com

tienen mayor duración, al igual que mayores amplitudes con respecto a la espesura de la película de líquido [3]. Dado que las ondas juegan un papel importante en los procesos de transporte entre las fases, como transferencia de masa, transferencia de cantidad de movimiento y transferencia de calor, se han realizado muchas investigaciones a lo largo de los años para estudiarlas [4–11]. Además, la relación entre las ondas, el arrastre de pequeñas gotas [12–14] y el mecanismo de formación de estas gotas a partir de las ondas es un tema en desarrollo [8, 15–18].



**Figura 59.** Fotografía y esquema de flujo anular con interfaz ondulada donde se indican los dos tipos de ondas, *ripple* y *disturbance waves* [8]

## 2.1 Ripple Waves [2, 19]

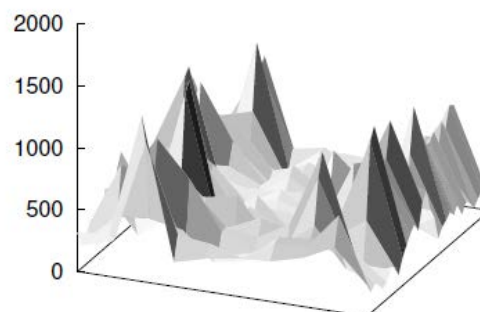
Las *Ripple Waves*, en las referencias llamadas también *Ephemeral Waves*, dominan la interfaz cuando el caudal del líquido es bajo, de tal forma que la interfaz parece lisa. Los autores reportan que estas ondas existen para números de Reynolds del líquido menor que un valor crítico, entre 200 y 330. Y también la velocidad del gas debe estar por encima de una velocidad crítica. Por ejemplo, para una mezcla de aire-agua la velocidad del gas debe ser mayor a 20m/s. En la región donde las ondas *Ripple Waves* dominan la interfaz, el factor de fricción interfacial está dado por la ecuación (1).

$$I = 1 + C(\delta_G^+ - 4) \quad (1)$$

Donde,  $\delta_G^+$  es la espesura adimensional de la película de líquido, definida por la ecuación (2).

$$\delta_G^+ = \frac{\delta \rho_G}{\mu_G} \sqrt{\frac{\tau_i}{\rho_G}} \quad (2)$$

La constante  $C$ , es igual a 0,045. En la mayoría de los casos prácticos,  $\delta_G^+$  no es mayor que cuatro y se puede aplicar el modelo para flujo anular ideal (con la interfaz lisa). En muchos de los experimentos y estudios encontrados en la literatura, las *Ripple Waves* no son consideradas dado que las ondas *Disturbance Waves* dominan la interfaz, haciendo que las *Ripple Waves* jueguen un papel menor. Por ejemplo, Sekoguchi [20] descubrió que las *Ripple Waves* son generadas y absorbidas por las *Disturbance Waves*. En la Figura 60, se muestran las ondas en la interfaz de un flujo anular vertical. En esta se pueden ver los dos tipos de ondas, *Ripple* y *Disturbance*, además se puede ver como hay *Ripple Waves* entre las *Disturbance Waves*.



**Figura 60.** Espesura de la película de líquido (en  $\mu\text{m}$ ) para flujo anular con  $V_{SL} = 0,08\text{m/s}$  y  $V_{SG} = 42\text{m/s}$  [21]

## 2.2 Disturbance Waves [22]

Las *Disturbance Waves* se presentan en el flujo anular para caudales del líquido por encima de un valor crítico y tienen una gran influencia debido a su tamaño y propiedades dinámicas. En la Tabla 32, se encuentra una recopilación de algunos trabajos sobre este tipo de ondas, donde es evidente que las *Ripple Waves* no son tenidas en cuenta para estudios de ondas en la interfaz.

**Tabla 32.** Trabajos referentes a las ondas en la interfaz entre las fases en flujo anular

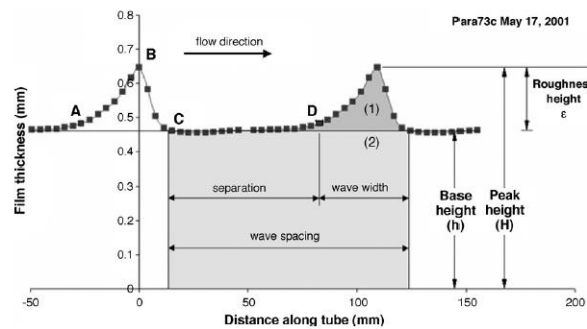
Ondas estudiadas	Fluidos – Diámetro del tubo	Método de observación	Fuente
Disturbance Waves (velocidades, frecuencias, número de onda)	Aire-agua 3,175 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad a 4000 cuadros/s	[23]
Disturbance Waves (velocidades y frecuencias)	Aire-agua 3,175 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad a 32 cuadros/s Sonda conductiva	[24]
Disturbance Waves (Amplitudes de las ondas)	Aire-agua Canal rectangular 30,48 cm x 2.54 cm	Sensor resistivo	[25]
Disturbance Waves (Amplitudes de las ondas, velocidades)	Aire-agua Canal rectangular 30,5 cm x 2.54 cm	Sondas conductivas	[26]
Disturbance Waves (Amplitudes de las ondas)	Aire-agua 3,18 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad a 50 cuadros/s	[27]
Disturbance Waves (Frecuencias y velocidades)	Aire-agua 1 cm, 3,2 cm, 5,8cm e 12,5 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad	[22]
Disturbance waves (Forma de las ondas y amplitudes, velocidad de la película)	Aire-agua 0,953 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad a 30 cuadros/s	[28]
Disturbance waves (Amplitudes, longitudes, velocidades)	Aire-agua 0,9525 cm	Sonda conductiva	[29]
Disturbance Waves (Amplitudes, frecuencias)	Aire-agua 1,1 cm	Laser	[30]
Disturbance Waves (Velocidad, amplitud, frecuencia, longitud de onda)	Aire-agua 0,94 cm	Sensores conductivos	[31]
Disturbance Waves (Velocidad, amplitud, frecuencia, longitud de onda)	Aire-agua Canal rectangular 5 x 5 cm	Sensores conductivos	[32]
Disturbance Waves (velocidades, amplitudes, longitud, gradiente de presión y fracción de vacío)	Hexafluoruro de azufre – agua 10 cm	Presión diferencial Sensores conductivos	[33]
Disturbance Waves (Amplitud)	Aire- agua 1,5 cm	Fluorescencia con Laser	[34]
Disturbance Waves (Velocidades, amplitudes, longitud de onda)	Aire-agua 2,37 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad	[35]
Disturbance Waves (Velocidades, amplitudes, frecuencias)	Aire-agua 5 cm	Sensores conductivos	[3]
Disturbance Waves (Velocidades y frecuencias)	Aire- agua 1,5 cm	Fluorescencia con Laser	[11]
Disturbance Waves (Velocidades, periodos, longitudes de onda)	Aire- agua 1,1 cm	Imágenes de cámara de alta velocidad a 1000 cuadros/s	[8]
Disturbance Waves (Velocidades)	Aire- agua 5,0 cm	Detector de infrarrojo	[10]
Disturbance Waves (Espesura de la película de líquido, frecuencias)	Aire- aceite 15,2 cm	Sensor <i>Wire-Mesh</i>	[36]

### 2.3 Características de las *Disturbance Waves*

Las *Disturbance Waves* son las principales responsables por la formación de pequeñas gotas en el núcleo gaseoso. La formación de estas gotas es conocida como atomización y el retorno de las gotas a la película líquida es llamado deposición. El arrastre es consecuencia de estos dos procesos y el factor de arrastre es fundamental para predecir el caudal del líquido en el núcleo. En este punto es importante definir algunas características de las *Disturbance waves* que son estudiadas en los diferentes trabajos experimentales [29]. Estas características son el espaciamiento entre ondas, la amplitud pico, la amplitud de la base de la onda, la amplitud de la rugosidad de la onda, la separación de onda y el ancho de onda. La Figura 61 muestra los detalles o características geométricas de una onda [29]:

- Espaciamiento entre ondas (*wave spacing*) es igual a la longitud total del tiempo dividido en el número de picos que aparecen en ese tiempo.
- Amplitud pico de la onda (*wave peak height, H*) está definida como la media de los picos observados en el tiempo de medida.
- Amplitud de la base de la onda (*wave base height, h*) es la media de la espesura de la película entre el punto final C, de la onda anterior y el punto inicial de la siguiente onda, D.
- Amplitud de la rugosidad de la onda (*wave roughness height, (H-h)*) es la diferencia entre la amplitud pico de la onda y la amplitud de la base de la onda.

- Separación de onda (*wave separation*) es la distancia entre el punto de inicio de una onda y el punto final de la onda previa.
- Ancho de onda (*wave width*) es la distancia entre el punto inicial de una onda y el final de esta.



**Figura 61.** Configuración de una onda del tipo *Disturbance Wave*. Tomada de [29]

En la literatura se presentan algunas conclusiones relevantes de las *Disturbance Waves*, a continuación, se resumen las más importantes:

- La relación entre la amplitud de las ondas y la espesura media de la película es del orden de cinco.
- La velocidad de las ondas es, de manera general, igual a 10% de la velocidad superficial del gas.
- La superficie de las ondas es altamente rugosa.
- La longitud de onda es mayor que la amplitud.
- El espaciamiento en las ondas no es uniforme, lo que da origen a una distribución de frecuencias con múltiples picos. El espaciamiento decrece a medida que los caudales de gas y de líquido aumentan.
- Una onda nunca sobrepasa otra onda. La coalescencia de ondas da origen a una onda más grande y más veloz, pero que desacelera a lo largo del tubo.

En lo que se refiere a la frecuencia se tiene que:

- La frecuencia aumenta con el aumento del caudal de líquido y de gas.
- La frecuencia de las ondas es alta inicialmente (cerca al inyector de líquido), y disminuye a medida que las ondas colapsen.
- La frecuencia aumenta con la densidad del gas para una velocidad dada del gas.
- En flujo vertical descendente, la frecuencia es independiente del caudal de gas, pero muestra una dependencia lineal para altos caudales de gas.

Sobre la velocidad de onda se puede decir que:

- La velocidad aumenta con el incremento de los caudales de líquido y gas. Sin embargo, el efecto del aumento del caudal del gas es más grande que el efecto del aumento del caudal de líquido.
- Hay un pequeño aumento en la velocidad a lo largo del tubo cuando el líquido es introducido.
- La velocidad decrece con la densidad del gas.
- Las velocidades siguen una distribución normal alrededor de una media y la varianza tiende a ser constante.
- La velocidad depende linealmente de la amplitud de la onda
- En flujo horizontal, la velocidad de onda en la parte superior es más alta que en la parte inferior del tubo.

En la Tabla 33 se presenta un resumen de los cambios en las ondas con el incremento de diferentes parámetros, como la velocidad del gas, el número de Reynolds y la presión.

**Tabla 33.** Resumen de los cambios en las características de las *Disturbance Waves* identificadas en [31]

Propiedad de la onda	Incrementando la velocidad del gas	Incrementando el número de Reynolds del líquido	Incrementando a presión
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta ligeramente
Amplitud	Disminuye	Aumenta	Disminuye
Espaciamiento	Disminuye	No hay dependencia	Disminuye
Frecuencia	Aumenta	Aumenta	Aumenta

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Dinámica de fluidos computacional

El movimiento de fluidos al interior de tuberías ha sido estudiado ampliamente con el uso de mecánica computacional de fluidos (CFD). El estudio de las ondas y el comportamiento de las interfaces en el movimiento de fluidos bifásicos ha sido tratado por diferentes autores. Tal es el caso de [37], donde se estudia mediante métodos numéricos usando CFD de fluidos gas-líquido. Como caso de estudio, los autores tomaron aire y agua para analizar el comportamiento de la interfaz a diferentes condiciones. Este fue un estudio realizado en un dominio tridimensional en estado de



transición y empleando el método de fluidos volumétrico (*VOF - volume of fluid method*) para realizar la simulación y análisis de la interfaz. Como resultado, se obtuvo un fluido de tipo anular que fue evaluado a diferentes velocidades tanto de agua como de aire. Otros autores [38], también han estudiado el comportamiento de fluidos bifásicos usando el modelo VOF con el fin de obtener información acerca del uso de refrigerantes y su cambio de fase. Los refrigerantes R134a y R404a fueron estudiados durante su proceso de evaporación y condensación, los cuales son usados comúnmente como agentes de transmisión de calor en diversas aplicaciones.

En [39], se realiza un estudio de la interfaz de un flujo bifásico aire-agua. El análisis CFD llevado a cabo, fue realizado usando el modelo VOF y utilizando un dominio en dos dimensiones. Dado que el estudio fue realizado en una tubería con sección circular, solo la mitad del tubo fue estudiada debido a su simetría axial. El dominio que plantean los autores fue la base para el dominio seleccionado en el presente estudio. Como resultado, obtuvieron que en general a velocidades bajas del agua, el flujo anular se mantiene sin presentar perturbaciones fuertes en la interface.

### 3.2 Parámetros de simulación

Se realizó un análisis usando CFD en un dominio bidimensional en estado de transición. Debido a la simetría axial que presenta la tubería, solo se hace necesario realizar la simulación de una de las partes tal y como se pudo observar en la Figura 4. En total la tubería es de 2 pulgadas de diámetro, pero el dominio de solución corresponde a 1 pulgada (25.4mm). Para lograr una buena precisión en la solución, el dominio también debe ser lo suficientemente largo como para que los fenómenos asociados se resuelvan al interior de este. Sin embargo, hay que tener cuidado con la longitud utilizada, ya que, si el dominio llega a ser muy largo, el tiempo de simulación podría ser mucho más del requerido utilizando un mayor recurso computacional de forma innecesaria. En este sentido, un dominio similar al planteado por [39] fue utilizado.

En general, las fronteras que definen el dominio son: entrada de agua y aire, una salida, pared del tubo y eje de simetría. A la entrada se ha configurado una velocidad del aire  $V_{aire} = 22m/s$  y una velocidad del agua de  $V_{agua} = 1m/s$  y  $4m/s$ , mientras a la salida, una presión manométrica de cero fue establecida. Para la simulación, inicialmente se tiene un tubo lleno de aire con una presión manométrica inicial de cero. Las temperaturas de ambos fluidos son las mismas de aproximadamente 300K.

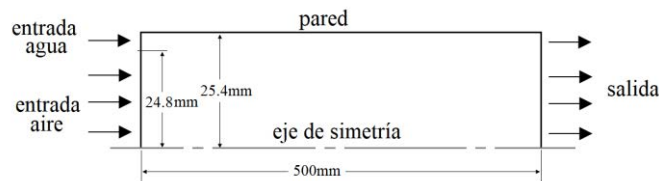


Figura 62. Dominio computacional

La primera fase fue definida como el aire y la segunda es el agua. El método de fluidos volumétricos fue usado para realizar la simulación (*VOF*). Las propiedades principales de las fases utilizadas se muestran a continuación:

Tabla 34. Propiedades fases

Fase	Densidad [ $kg/m^3$ ]	Viscosidad [ $kg/m.s$ ]
Aire	1.225	1.7894e-5
Agua	998.2	1.003e-3

La malla implementada es estructurada, está compuesta esencialmente de cuadriláteros. Una porción de la malla utilizada con alrededor de 17000 nodos es presentada en la Figura 63.

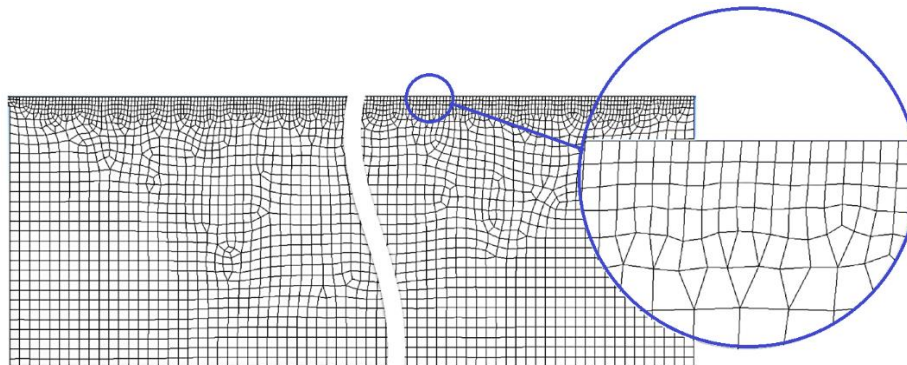
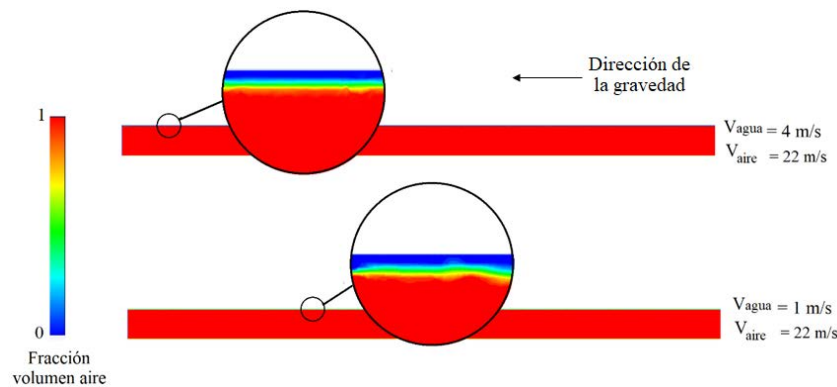


Figura 63. Enmallado utilizado

## 4. RESULTADOS

En la Figura 64, es posible visualizar los resultados parciales obtenidos de las pruebas realizadas. La velocidad del aire se mantuvo igual para ambos casos ( $20m/s$ ), mientras para el agua, se realizaron pruebas con dos velocidades

diferentes ( $4\text{ m/s}$  y  $1\text{ m/s}$ ). Si bien autores como [40], han demostrado de forma principalmente experimental, que el diámetro de la tubería juega un papel importante en el patrón presente en la interface, en el presente trabajo solo se tuvo en cuenta la variación de las velocidades más no el cambio de una dimensión geométrica.



**Figura 64.** Resultados preliminares

La película de agua que se forma en la pared es un resultado importante y es posible afirmar que, a estas condiciones de velocidad, se puede obtener un flujo anular entre las dos fases aire-agua estudiadas.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión de la literatura, hay algunos fenómenos o parámetros que no hacen parte de los modelos que se usan para modelar flujos anulares, pero que es claro tienen incidencia en los resultados experimentales y deben ser incluidos en los análisis. Por ejemplo, el fenómeno de arrastre de gotas hacia el núcleo en el flujo anular aire-agua.

Muchos de los autores consultados han observado la existencia de las ondas interfaciales en el flujo anular aire-agua y han conseguido precisar algunas de sus características como la amplitud, duración, frecuencia y longitud de onda. Sin embargo, hay pocos trabajos enfocados en la predicción del comportamiento de estas ondas.

Es necesario realizar simulaciones en CFD utilizando mallas refinadas que permitan acercarnos apropiadamente a parámetros obtenidos experimentalmente.

Para el análisis numérico, el modelo VOF fue implementado para simular el comportamiento de las fases involucradas. Una malla de aproximadamente 17000 nodos con refinamiento cerca a la pared fue desarrollada para llevar a cabo la simulación. El espesor de la película de agua, así como su comportamiento a lo largo de la tubería cambia dependiendo de las velocidades involucradas. Para realizar este análisis es necesario realizar más simulaciones que permitan obtener resultados más concretos y poder comparar con resultados reportados en la literatura. También, se planea estudiar interacciones con otros tipos de fluidos, tanto bifásicos como trifásicos, los cuales tienen especial importancia en diferentes sectores industriales.

## REFERENCIAS

- [1] Lima, L. & Rosa, E. (2010). Análise dos modelos de fases separadas e de mistura. In: Mec. Comput.
- [2] Levy, S. (1999). Two-Phase Flow in Complex Systems. Wiley.
- [3] Belt, R. et al. (2010). Time & spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow. *International Journal of Multiphase Flow* 36(7), 570–587.
- [4] Sekoguchi, K. & Takeishi, M. (1989). Interfacial Structures in Upward Huge Wave Flow & Annular Flow Regimes. *October* 15(3), 295–305.
- [5] Asali, J. & Hanratty, T. (1993). Ripples generated on a liquid film at high gas velocities. *International Journal of Multiphase Flow* 19(2), 229–243.
- [6] Schubring, D. & Shedd, T. (2008) Wave behavior in horizontal annular air–water flow. *International Journal of Multiphase Flow* 34(7), 636–646.
- [7] Setyawan, A. et al. (2016). The effect of the fluid properties on the wave velocity & wave frequency of gas-liquid annular two-phase flow in a horizontal pipe. *Experimental Thermal & Fluid Science* 71, 25–41.
- [8] Dasgupta, A. et al. (2017). Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn & annular regime. *Experimental Thermal & Fluid Science* 81, 147–163.
- [9] Vasques, J. et al. (2018). Comparison of disturbance wave parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe. *Experimental Thermal & Fluid Science* 3, 0–1.
- [10] Wang, C. et al. (2018). Interfacial wave velocity of vertical gas-liquid annular flow at different system pressures. *Experimental Thermal & Fluid Science* 92, 20–32.
- [11] Alekseenko, S. et al. (2015). Study of formation & development of disturbance waves in annular gas-liquid flow. *International Journal of Multiphase Flow* 77, 65–75.
- [12] Jacowitz, L. & Brodkey, R. (1964). An analysis of geometry & pressure drop for the horizontal, annular, two-phase flow of water & air in the entrance region of a pipe. *Chemical Engineering Science* 19(4), 261–274.
- [13] Han, H. & Gabriel, K. (2007) A Numerical Study of Entrainment Mechanism in Axisymmetric Annular Gas-Liquid Flow. *Journal of Fluids Engineering* 129(3), 293.
- [14] Liu, L. & Bai, B. (2017). Generalization of droplet entrainment rate correlation for annular flow considering disturbance wave properties. *Chemical Engineering Science* 164, 279–291.
- [15] Alekseenko, S. et al. (2009). Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream. *International Journal of Multiphase Flow* 35(7), 617–627.
- [16] Alekseenko, S. et al. (2010). Secondary instability of waves in annular two-phase flow with & without entrainment. *Journal of Physics: Conference Series* 216, 12–16.
- [17] Xie, Z. et al. (2017). Numerical study of three-dimensional droplet impact on a flowing liquid film in annular two-phase flow. *Chemical Engineering Science* 166, 303–312.
- [18] Cherdantsev, A., Hann, D. & Azzopardi, B. (2014). Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure & its relation to liquid entrainment. *International Journal of Multiphase Flow* 67, 52–64
- [19] Rodriguez, O. (2011). Escoamento Multifásico. ABCM.
- [20] Sekoguchi, K. et al. (1978). On Ripple of Annular Two-Phase Flow. *Bulletin Oh the the Japan Society of Mechanical Engineers* 21(152), 154–167.
- [21] Belt, R. et al. (2009). Prediction of the interfacial shear-stress in vertical annular flow. *International Journal of Multiphase Flow* 35(7), 689–697.
- [22] Azzopardi, B. (1997). Drops in annular two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow* 23, 1–53.
- [23] Nedderman, R. & Shearer, C. (1963). The motion & frequency of large disturbance waves in annular two-phase flow of air-water mixtures. *Chemical Engineering Science* 18(10), 661–670.
- [24] Taylor, N., Hewitt, G. & Lacey, P. (1963). The motion & frequency of large disturbance waves in ammlar two-phase flow of air-water mixtures. *Chemical Engineering Science* 18, 537–552.
- [25] Miya, M., Woodmansee, D. & Ty, T. (1970). A model for roll waves in gas-liquid flow. *Chemical Engineering Science* 26(11), 1915–1931.
- [26] Bruno, K. & Mccready, M. (1988). Origin of Roll Waves in Horizontal Gas-Liquid Flows. *AIChE Journal* 34(9), 43–51.
- [27] Wolf, A., Jayanti, S. & Hewitt, G. (1996). On the Nature of Ephemeral Waves In Vertical Annular Flow. *International Journal of Multiphase Flow* 22(2), 325–333.
- [28] Wang, Z., Gabriel, K. & Zhu, Z. (2005). A model of interfacial waves in annular two-phase flow at different gravity levels. *Microgravity - Science & Technology* 16(1–4), 259–263.
- [29] Han, H., Zhu, Z. & Gabriel, K. (2006). A study on the effect of gas flow rate on the wave characteristics in two-phase gas-liquid annular flow. *Nuclear Engineering & Design* 236(24), 2580–2588.
- [30] Hazuku, T., Takamasa, T. & Matsumoto, Y. (2008). Experimental study on axial development of liquid film in vertical upward annular two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow* 34(2), 111–127.
- [31] Sawant, P. et al. (2008). Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow. *Nuclear Engineering & Design* 238(12), 3528–3541.
- [32] Damsohn, M. & Prasser, H. (2009). High-speed liquid film sensor with high spatial resolution. *Measurement Science & Technology* 20(11), 114–121.
- [33] Johnson, G., Bertelsen, A. & Nossen, J. (2009). A Mechanistic Model for Roll Waves for Two-Phase Pipe Flow. *AIChE Journal* 55(11), 2788–2795.
- [34] Alekseenko, S. et al. (2009). Two-wave structure of liquid film & wave interrelation in annular gas-liquid flow with & without entrainment. *Physics of Fluids* 21(6), 61–70.
- [35] Schubring, D. et al. (2010). Studying disturbance waves in vertical annular flow with high-speed video. *International Journal of Multiphase Flow* 36, 385–396.

- [36] Aydin, T. et al. (2015). On the characteristics of the roll waves in gas-liquid stratified-wavy flow: A two-dimensional perspective. *Experimental Thermal & Fluid Science* 65, 90–102.
- [37] Mazdak, P. et al. (2016). Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow. *Chemical Engineering Research & Design* 105, 71–84.
- [38] Fadhil, B., Wrobel, L. & Jouhara, H. (2015). CFD modelling of a two-phase closed thermosyphon charged with R134a & R404a. *Applied Thermal Engineering* 78, 482–490.
- [39] Shine, S., Sunil, S. & Suresh, B. (2013). Numerical study of wave disturbance in liquid cooling film. *Propulsion & Power Research* 2(2), 107–118.
- [40] Abubakar, A. et al. (2017). Effect of pipe diameter on horizontal oil-water flow before & after addition of drag-reducing polymer part I: Flow patterns & pressure gradients. *Journal of Petroleum Science & Engineering* 153, 12-22.

La sericina de seda es una proteína globular obtenida del proceso de desengomado de filamentos de capullos de seda. Debido a sus características biológicas como la permeabilidad al oxígeno, la acción antioxidante, la capacidad reguladora de humedad, la resistencia a los rayos UV, así como propiedades antibacterianas, anticancerígenas y anticoagulantes, esta proteína está siendo empleada en el desarrollo de materiales para aplicaciones biomédicas. Investigaciones recientes han demostrado que las propiedades fisicoquímicas de la sericina tienen efectos positivos sobre la adhesión y proliferación de queratinocitos y fibroblastos, haciéndola útil en el desarrollo de biomateriales para la ingeniería de tejidos. En Colombia es muy incipiente el conocimiento sobre las propiedades de la sericina, las cuales dependen principalmente de las características genéticas del gusano, de las condiciones de extracción y transformación de ésta. Por lo anterior, en este estudio se extrajo sericina a partir de capullos defectuosos suministrados por la Corporación para el Desarrollo de la Sericultura del Cauca-CORSEDA (Colombia), y se fabricaron esponjas empleando la técnica de liofilización, con el fin de obtener información acerca de sus características físicas, químicas y morfológicas. La estructura secundaria, la morfología y la estabilidad térmica de las esponjas se determinaron mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, microscopía electrónica de barrido, y análisis termogravimétrico, respectivamente. También, se investigó la capacidad de absorción de agua, y la degradación empleando una solución de fluido corporal simulado (SBF pH 7,4). Los resultados indican que las esponjas fabricadas tienen un contenido de estructuras cristalinas del 59,98 %, una morfología laminar con poros irregulares pequeños y una alta densidad de poros. Los estudios de absorción mostraron un 688,41 % de absorción de agua a las 12 h, junto con una degradación del 48 % en el séptimo día. Estos resultados sientan las bases para el uso de la sericina obtenida de capullos de producción colombiana como un biopolímero para la formación de materiales porosos para posibles aplicaciones biomédicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La sericultura es considerada una actividad agrícola por el cultivo de la morera *Morus sp*, pecuaria por la cría del gusano de seda doméstico *Bombyx Mori*, y agroindustrial por la transformación del hilo de seda en la industrial textil [1]. Los hilos de seda son fabricados a partir de filamentos extraídos del capullo, los cuales están constituidos principalmente por dos proteínas, la fibroína (SF) y la sericina (SS), las cuales representan entre un 70-75 % y 25-30 % del peso total de la seda, respectivamente. Adicionalmente, presenta cantidades pequeñas de sustancias cerosas, sales minerales y materia colorante [2].

El proceso de transformación textil de la seda consta principalmente de 5 etapas: (1) el desborre, donde se retira la borra, una fibra de seda laxa que mantiene amarrados los capullos a una estructura de sostén; (2) secado de capullos, que se realiza para deshidratar las pupas y detener su proceso de metamorfosis; (3) devanado del capullo, etapa donde se obtienen madejas de seda cruda, aquí los capullos son sumergidos en agua caliente para ablandar la sericina y permitir separar el filamento del capullo; (4) desengomado, en esta etapa se elimina la sericina y demás contaminantes naturales para obtener un hilo suave, brillante y fácil de manejar; y (5) procesos tintóreos y acabados [1].

Durante el proceso de transformación de la seda se producen diferentes residuos, entre ellos capullos defectuosos y fibras cortas, que son transformadas en productos textiles y artesanías de bajo valor agregado. Además, se produce SS en la etapa de desengomado [3]. Este proceso se realiza empleando soluciones acuosas que contienen generalmente detergentes, ácidos y sales, los cuales, al igual que la sericina terminan como residuos del proceso textil.

La SS es una proteína que envuelve las fibras de SF y actúa como aglutinante para mantener la integridad estructural de los capullos [4]. Está compuesta por fuertes cadenas laterales polares, como grupos hidroxilo, carboxilo y amino, que contribuyen a su naturaleza altamente hidrofílica. La sericina se ha utilizado recientemente en aplicaciones cosméticas y biomédicas debido a sus características biológicas, como la excelente permeabilidad al oxígeno, la acción antioxidante, la capacidad reguladora de la humedad, la resistencia a los rayos UV, así como a sus propiedades antibacterianas, anticancerígenas y anticoagulante [5, 6, 7, 8]. Investigaciones recientes han demostrado que la SS puede formar con éxito biomateriales para ser implementados en la ingeniería de tejidos y como material para promover la curación de heridas, tema sobre el cual aún se encuentran pocos estudios en comparación con otras proteínas [9-18].

---

<sup>1</sup> maria.arangosa@upb.edu.co

<sup>2</sup> adriana.restrepo@upb.edu.co

<sup>3</sup> catalina.alvarezl@upb.edu.co

Para estas aplicaciones, la sericina debe recuperarse luego del proceso de desengomado y puede fabricarse en diferentes formas, incluyendo geles, esponjas [19], películas y fibras [20, 21]. Entre estas presentaciones, el gel y las esponjas sobresalen porque pueden elaborarse fácilmente y usarse con eficacia en aplicaciones biomédicas. Las esponjas de sericina pueden fabricarse mediante la técnica de liofilización y sus características están influenciadas principalmente por el peso molecular, la concentración de la SS y las condiciones del proceso [22]. Debido a que las esponjas de sericina tienen una alta porosidad, se convierten en elementos potenciales para su aplicación en el desarrollo de materiales biomédicos, incluidos los apósitos para heridas y parches [23], sin embargo, sus propiedades mecánicas débiles han limitado su uso extensivo en esos campos.

En Colombia todavía es muy poco el conocimiento sobre las proteínas de la seda, debido a esto, es esencial generar un conocimiento de biomateriales a base de sericina colombiana, teniendo en cuenta los estudios desarrollados a nivel internacional. Para esto, es importante considerar que las propiedades de la proteína están relacionadas con: las características genéticas y modificables del gusano de seda que se dan por el sitio de producción, y las condiciones de operación como la temperatura, humedad ambiental, aire, iluminación, alimento, entre otras [1, 24].

Por lo anterior, en este trabajo se estudiaron las propiedades de esponjas elaboradas con sericina proveniente de capullos defectuosos de la agroindustria serícola colombiana, usando la técnica de liofilización. Con el fin de conocer algunas de las características de los materiales elaborados, se determinaron sus propiedades morfológicas, mecánicas y estructurales, se determinó su tasa de degradación y su capacidad de absorción de agua.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Extracción y recuperación de la sericina de seda

Para la extracción de la sericina se utilizaron capullos defectuosos suministrados por CORSEDA, los cuales se cortaron en trozos pequeños. La sericina se extrajo usando la técnica de desengomado a alta temperatura y presión con agua caliente. Para la extracción se empleó una autoclave a una temperatura de 120 °C durante 30 min, en una relación de baño de 1:30 (g de capullos/mL agua). Transcurrido este tiempo la solución de sericina obtenida se filtró empleando una bomba de vacío para eliminar material particulado y posibles impurezas presentes en la solución. Posteriormente, se realizó un proceso de deshidratación por aspersión, empleando un equipo marca BUCHI (B 290), manteniendo una temperatura de entrada 160 °C, un flujo de aspersión de 40 m<sup>3</sup>/h y un caudal de 6,3 mL/min. El polvo de sericina obtenido se almacenó en un desecador.

### 2.2 Elaboración de esponjas de sericina

Se realizó una disolución del polvo de sericina en agua destilada a una concentración del 2 % (w/v) empleando una autoclave a las mismas condiciones mencionadas anteriormente. La solución obtenida se vertió en recipientes plásticos de 7 mL, se congeló a -80 °C durante 24 h, y posteriormente se liofilizó (liofilizador marca Labconco). Las esponjas obtenidas fueron almacenadas en un desecador hasta su posterior caracterización.

### 2.3 Caracterización de esponjas de sericina

- *Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)*. La estructura química de las esponjas fue analizada mediante la técnica de FTIR con un módulo de reflectancia total atenuada (ATR), en un espectrómetro marca Nicolet 6700 Series. Se realizaron 64 barridos a una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y una longitud de onda de 4000-400 cm<sup>-1</sup>. Se efectuó una deconvolución en la región de la amida I (1600-1700 cm<sup>-1</sup>) empleando el software OMNIC con un ajuste de curvas gaussianas. El porcentaje de estructuras secundarias individuales se determinó en correlación con las estructuras secundarias totales usando la Ecuación (1).

$$\% \text{ Estructuras secundarias individuales} = \frac{A_m}{A_T} * 100 \quad (1)$$

Donde  $A_m$  y  $A_T$  es el área máxima de estructuras secundarias individuales y el área total de las estructuras secundarias, respectivamente.

- *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*. La morfología de las esponjas fue examinada por SEM en alto vacío con un detector de electrones secundarios marca JEOL JSM-6490LV. Previo al análisis de las muestras se realizaron cortes horizontales y verticales para su observación (Figura 1) y se hizo un recubrimiento delgado de oro utilizando un equipo marca DENTON VACUUM Desk IV, hasta obtener un espesor de 10 nm.

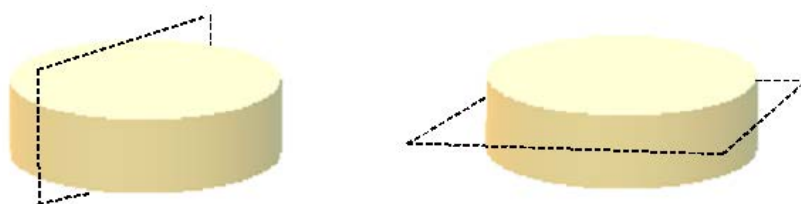


Figura 65. Ilustración de corte vertical (a) y horizontal (b) realizado a las esponjas

- **Análisis termogravimétrico (TGA).** El comportamiento térmico se determinó empleando una balanza termogravimétrica Mettler Toledo TGA Q500. Los termogramas se obtuvieron bajo una atmosfera inerte de N<sub>2</sub> para evitar procesos oxidativos, con un flujo de 50 mL/min, en un rango de temperatura de 30 a 800 °C y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.
- **Capacidad de absorción de agua.** El estudio de absorción de agua se realizó con base a lo reportado por Mandal, Priya y Kundu [14]. Las esponjas liofilizadas se pesaron en estado seco y luego se sumergieron en 50 mL de agua destilada, sostenidas en una rejilla durante intervalos de 6, 12 y 24 h. Transcurrido cada intervalo de tiempo las esponjas se retiraron cuidadosamente, se removió el exceso de agua de la rejilla y posteriormente fueron pesadas. El porcentaje de absorción de agua de las esponjas se calculó usando la Ecuación (2). Los ensayos se realizaron por triplicado.

$$\% \text{ Absorción de agua} = \frac{w_s - w_h}{w_h} * 100 \quad (2)$$

Donde,  $w_s$  (g) y  $w_h$  (g) son el peso de las muestras en estado seco y húmedo, respectivamente.

- **Degradación in vitro.** Las esponjas de sericina fueron inmersas en una solución de fluido corporal simulada (SBF pH 7,4), se incubaron a 37 °C durante 1 y 7 días. Después del intervalo de tiempo específico, las esponjas se secaron durante 24 h para eliminar el exceso de agua y obtener el peso seco final. El porcentaje de degradación se calculó empleando la ecuación (3).

$$\% \text{ Degradación} = \frac{w_i - w_f}{w_i} * 100 \quad (3)$$

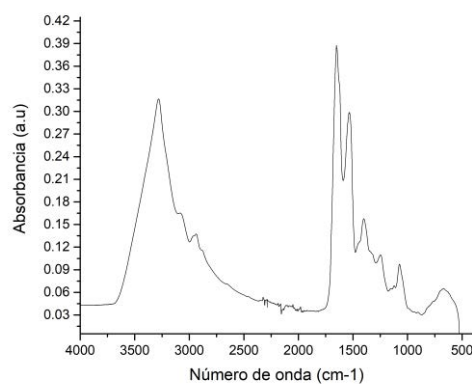
Donde,  $w_i$  (g) y  $w_f$  (g) son los pesos de la esponja antes y después de la degradación durante el intervalo de tiempo especificado, respectivamente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Estructura química de esponjas de sericina

En la sericina, las unidades de repetición de polipéptidos producen múltiples bandas características de absorción infrarroja incluidas la amida A y B (3000-3500 cm<sup>-1</sup>), y las amidas I, II y III. Las amidas A y B (3268 cm<sup>-1</sup>) están relacionadas con el estiramiento de los enlaces N-H que se superponen con aminoácidos hidroxilados como serina y treonina [25]. La amida I (1600-1700 cm<sup>-1</sup>) se asocia con las vibraciones del estiramiento C=O de los enlaces peptídicos, por lo cual son más sensibles a la orientación molecular y estructura secundaria de la proteína [26]. La amida II (1504-1582 cm<sup>-1</sup>) está relacionada con la flexión entre los enlaces N-H y la vibración del estiramiento de los enlaces C-N. La amida III (1200-1300 cm<sup>-1</sup>) representa principalmente la vibración del estiramiento de enlaces C-N vinculados a la vibración de la flexión N-H en el plano. De éstas, la amida I es la banda más útil para analizar las estructuras secundarias de proteínas [26, 27].

El espectro característico de las esponjas de sericina se muestra en la Figura 2. De acuerdo a los resultados, es posible evidenciar picos principales que corresponden a una estructura  $\alpha$ -hoja, debido a que la amida I se encuentra en 1637 cm<sup>-1</sup>, la amida II en 1516 cm<sup>-1</sup>, y la amida III en 1240 cm<sup>-1</sup> [28, 29]. Kim et al. [30] presentan en su investigación resultados similares, donde obtienen una sericina liofilizada con una estructura  $\beta$ -hoja. Los autores observaron, además, que para lograr un mayor contenido de estructura a espiral al azar podían agregar lioprotectores.



**Figura 66.** FTIR - ATR de la esponja de sericina

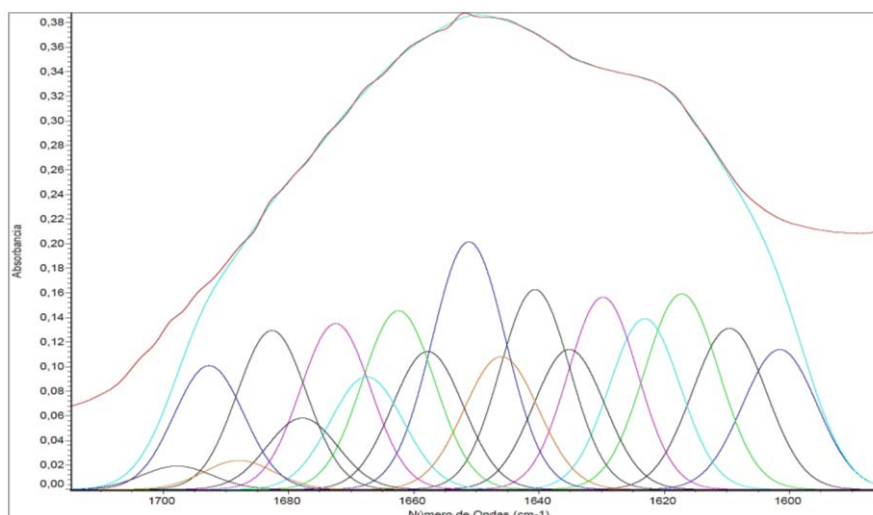
Para un mejor análisis y con el fin de determinar el porcentaje de estructuras secundarias que predominan en la muestra, se realizó un análisis cuantitativo para la región amida I, como se mencionó anteriormente. El análisis de la amida I da lugar a la presencia de 18 picos (Figura 3), los cuales se asocian a las diferentes estructuras secundarias de la sericina (Tabla 1) [30, 31]. El contenido relativo de cada estructura secundaria se calculó como la razón entre el área de los picos asociados a dicha estructura, y el área total de la curva ajustada [32].

Teniendo en cuenta estos resultados, se encontró que las esponjas de sericina obtenidas presentan regiones cristalinas ( $\beta$ -hoja y giros- $\beta$ ) y amorfas [33] (espirales al azar,  $\beta$ -hélices, y cadenas laterales) con un 59,98 y 40,02 % respectivamente. Estas conformaciones son resultado del proceso de fabricación de la esponja, ya que la temperatura de congelación influye en la conformación de las estructuras dentro del material, como se reportó en un estudio realizado por Tao, Lie y Xie [34]. Los autores observaron que la temperatura de congelación tiene una influencia sobre los picos de absorción de la amida I. A temperaturas más bajas, el número de onda cambia a una posición superior, lo que indica que el contenido de estructuras  $\beta$ -hoja disminuye y el de las estructuras amorfas (espirales al azar) aumenta de manera relativa [34, 35]. Además, observaron que la ultracongelación de las esponjas de sericina a  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  produce un mayor contenido de giros- $\beta$  comparadas con las esponjas que se obtuvieron a mayores temperaturas ( $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ ). Este resultado tiene relación con los encontrados en esta investigación (Tabla 1), donde se encuentra que la estructura predominante son los giros- $\beta$  (32,14 %).

**Tabla 35.** Porcentaje de estructuras secundarias contenidas en esponjas de sericina

Estructura secundaria	Banda de absorción	%
$\beta$ -Hoja	1610-1640 $\text{cm}^{-1}$	27,84
	1695-1700 $\text{cm}^{-1}$	
Espirales al azar	1640-1650 $\text{cm}^{-1}$	22,66
$\beta$ -Hélices	1650-1660 $\text{cm}^{-1}$	5,29
Giros- $\beta$	1660-1695 $\text{cm}^{-1}$	32,14
Cadenas laterales	1600-1610 $\text{cm}^{-1}$	12,07

Por otro lado, Jang y Um [23] fabricaron esponjas de sericina tratadas con etanol a diferentes concentraciones. En el estudio de la conformación química del material reportaron picos de absorción de IR a 1620 y 1510  $\text{cm}^{-1}$  característicos de la estructura cristalina  $\beta$ -hoja. Los autores indican que esta conformación ocurre durante la fabricación de la esponja de sericina mediante la técnica de liofilización, lo cual corrobora lo analizado en esta investigación.



**Figura 67.** Deconvolución de la región amida I (1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ ) de las esponjas de sericina

### 3.2 Morfología de esponjas de sericina- SEM

La Figura 4 muestra las imágenes SEM del corte vertical y horizontal de las esponjas de sericina liofilizadas. Se observa una morfología laminar con poros irregulares, con estructuras tipo panel. En la imagen del corte vertical se evidencia configuraciones tipo lámina que pueden ser atribuidas al tipo de corte realizado [22]. Por otra parte, la imagen del corte horizontal muestra alta densidad de poros, también se observan poros pequeños no interconectados atribuibles a la sublimación y la presión negativa que ejerce el agua durante la liofilización. En las esponjas el tamaño de poro depende del tamaño de los cristales de hielo formados durante la congelación: cuanto mayor sean éstos, mayor será el tamaño de poro [34]. De acuerdo con la literatura, temperaturas bajas de congelación ( $-80\text{ }^\circ\text{C}$ ) favorecen la formación de cristales pequeños [22, 34], lo que confirma los resultados obtenidos en la presente investigación.

Tao, Lie y Xie [34] muestran en su estudio una morfología similar a las obtenidas en este informe, donde consiguen una estructura porosa, con poros anómalos. Los autores concluyeron que la porosidad y el radio de poro son más pequeños y que la densidad de poro es mayor cuando la temperatura de congelación es menor ( $-80\text{ }^\circ\text{C}$ ). Andamios a base de sericina reticulados con acetato de polivinilo (PVA) obtenidos por Aramwit et al. [16] fueron analizados por microscopía electrónica de barrido. Los autores observaron que la sección transversal del andamio presentaba una porosidad no interconectada, con poros abiertos y cerrados, y una distribución de poros heterogénea. Observaron además que al mezclar los andamios con glicerina se obtenía una mejor uniformidad del poro. Por lo anterior, se puede deducir que la técnica de deshidratación y las mezclas que se realicen en el material, influyen significativamente en la morfología y tamaño de poro obtenidos.



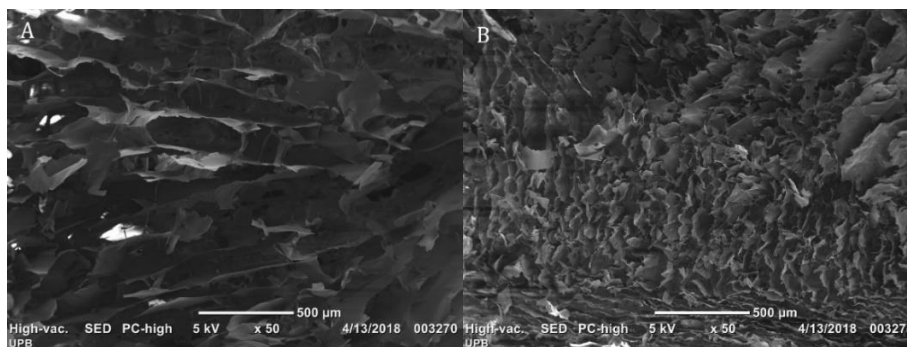


Figura 68. Imágenes SEM corte vertical (A) y corte horizontal (B)

### 3.3 Análisis termogravimétrico - TGA

En las Figuras 5a y 5b se presentan las curvas obtenidas para el ensayo de TGA y su primera derivada (DTG) de las esponjas de sericina. Ambas curvas evidencian una degradación térmica de la muestra en dos fases: una fase de deshidratación, la cual ocurre entre 25 y 103 °C, correspondiente a una pérdida de masa de aproximadamente 5-6 %, y que es atribuida a la evaporación de agua remanente presente en la esponja; la segunda fase, correspondiente a la degradación de los compuestos moleculares constitutivos de la muestra, ocurre en el rango entre 220-510 °C, con una temperatura de máxima velocidad de degradación de 305 °C aproximadamente. Esta fase está relacionada con la eliminación de compuestos volátiles, seguido de la degradación de grupos de cadenas laterales de residuos de aminoácidos, así como a la escisión de los enlaces peptídicos de la proteína, y la carbonización de la estructura primaria [36-38].

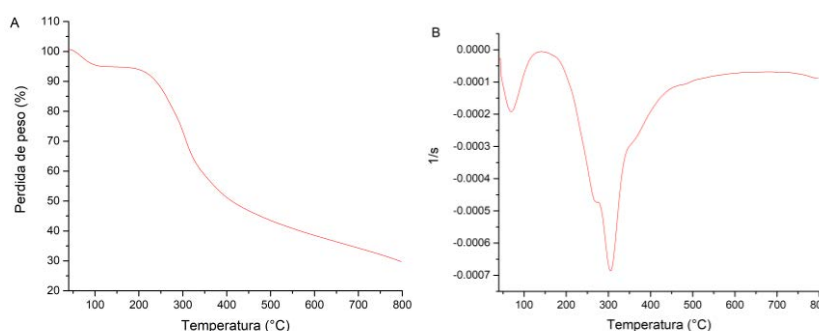


Figura 69. TGA (A) y DTG (B) para las esponjas de sericina liofilizadas

Los resultados obtenidos coinciden con los patrones de pérdida de masa de la sericina reportados por Gupta, Agrawal y Rangí [2]. Adicionalmente, resultados similares han sido obtenidos en el estudio publicado por Lamboni et al [13], en relación con la estabilidad térmica de biomateriales compuestos de sericina y celulosa bacteriana (BC), evaluada mediante la técnica de análisis termogravimétrico. El estudio muestra una degradación en dos eventos térmicos atribuidos a: una fase de deshidratación, desde una temperatura ambiente hasta los 230 °C, y una fase de degradación principal atribuida a la degradación de la sericina, dada entre los 240-400 °C.

### 3.4 Capacidad de absorción de agua

El grado de absorción de las esponjas de sericina después de la inmersión en agua en diferentes períodos de tiempo se muestra en la Figura 6. Cuando las esponjas se sumergen en agua se hinchan rápidamente en las primeras 4 h, hasta un 510,52 %. Debido al gran área superficial y su carácter hidrofílico se observa un aumento adicional de 117,83 % en la absorción de agua entre las 4 y 6 h, y de 60,0 % entre las 6 y 12 h. Posterior, a las 12 h, se presenta una pérdida de peso. Esto se debe, entre otras razones, a la solubilidad que presenta la muestra por la presencia de estructuras amorfas, lo cual puede llevar a una desintegración parcial del material.

Estos mismos resultados son reportados por Posada [39], quien observó una continua absorción de agua hasta las 12 h, lo cual es atribuido al tamaño de poro ( $26,02 \pm 17,68 \mu\text{m}$ ) y la concentración de las muestras (2 % (w/v)). Al igual que en esta investigación, las esponjas obtenidas por el autor se saturaron a las 12 h con una disminución posterior de su peso. Este efecto es atribuido al alto contenido de estructuras giros- $\beta$  en el material, las cuales le dan una mayor solubilidad a la muestra. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en la presente investigación por medio de espectroscopia infrarroja, donde se encontró que la esponja posee una mayor cantidad de giros- $\beta$  (32,14 %) en comparación con otras estructuras.

La absorción de agua es un factor clave para las propiedades superficiales y mecánicas de las esponjas, de igual forma, influye en la eventual carga/liberación de especies bioactivas en estos materiales, así como en los procesos degradativos [37]. Si se obtiene una alta capacidad de absorción de agua en el material, sin afectar la integridad del

mismo, esto sugiere que absorberá fácilmente y mantendrá los medios nutrientes dentro de la matriz, proporcionando así alimento a las células en crecimiento para su proliferación y supervivencia [14]. Teniendo en cuenta que los resultados de la presente investigación sugieren una desintegración del material, se concluye que, si se quiere potencializar el uso de esponjas de sericina en ingeniería de tejidos, es necesario aumentar su porcentaje de estructuras cristalinas para disminuir su solubilidad o realizar mezclas con otros polímeros que mejoren su estabilidad.

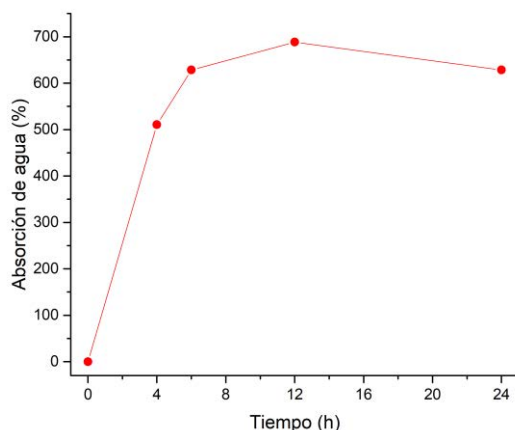


Figura 70. Porcentaje de absorción de agua de esponjas de sericina

### 3.5 Degradación in vitro

La caracterización del perfil de degradación del material permite saber si el tiempo de descomposición y otros atributos de degradación del material apoyarán al tejido en regeneración, el tiempo suficiente para que adquiera la integridad funcional y estructural apropiada a medida que se degrada el material [40, 41]. Por lo anterior, se realizó un acercamiento al comportamiento de las esponjas de sericina en contacto con un fluido corporal simulado. El porcentaje de degradación de las esponjas después de la inmersión en SBF (pH 7,4) se muestran en la Figura 7. En el día 1 y 7 las esponjas perdieron 13 y 48 % de su peso respectivamente. Los resultados indican que se da una disminución de la masa proteica de las muestras al estar un mayor tiempo en contacto con la solución.

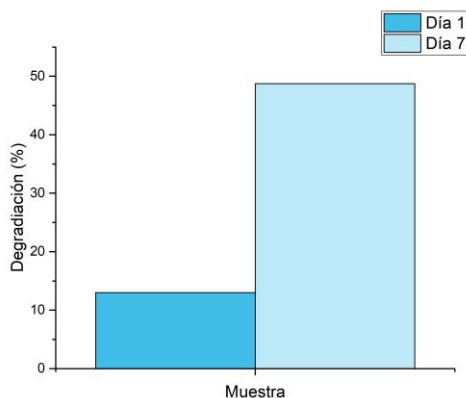


Figura 71. Porcentaje de degradación de esponjas de sericina en solución SBF pH 7,4

En el estudio realizado por Mandal, Priya, y Kundu [14], para esponjas compuestas de sericina y gelatina, se encontró que el porcentaje de degradación varía con la concentración de sericina: entre mayor porcentaje de sericina mayor es el porcentaje de degradación. Los autores encontraron una degradación de aproximadamente 7 % para una relación de 2:2 sericina:gelatina en el día 7 [14]. Por otro lado, Siritientong, Srichana y Aramwit [42], en su estudio realizaron andamios de sericina con el fin de evaluar el efecto del proceso de esterilización de éstos por diferentes métodos. Los resultados exhibieron una degradación de aproximadamente el 90 % para andamios de SS no esterilizados y del 40 % para andamios de SS esterilizados con etanol después de una inmersión en una solución tampón de fosfato (pH 7,4) a 37 °C durante 24 h. Los materiales a base de sericina reportados en la literatura presentan una menor degradación al realizarles tratamientos o mezclas con otros polímeros. Esto sugiere que para obtener un porcentaje de degradación menor en esponjas a base de sericina es necesario realizar mezclas con otros polímeros o tratamientos que favorezcan su estabilidad en este tipo de pruebas.

## 4. CONCLUSIONES

Este estudio muestra las propiedades de esponjas de sericina fabricadas mediante la técnica de liofilización. Los resultados mostraron que el material presenta una estructura principalmente cristalina (59,98 %), una temperatura

máxima de degradación a los 304 °C, una morfología laminar con poros irregulares y pequeños, una máxima absorción de agua a las 12 h, y una degradabilidad del 48 % a los 7 días. De acuerdo con los resultados, es necesario mejorar su estabilidad estructural por medio de tratamientos o mezclas con otros polímeros que favorezcan el uso de la sericina en el desarrollo de biomateriales para aplicaciones en la regeneración de tejidos.

Este trabajo proporciona un acercamiento al uso de la sericina colombiana, que actualmente es un subproducto de los procesos empleados para la obtención de la seda, como biopolímero natural para la fabricación de materiales porosos con posibles aplicaciones en el campo biomédico.

## REFERENCIAS

- [1] Pescio, F. et al. (2009). Manual para la producción. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- [2] Gupta, D., Agrawal, A. & Rangi, A. (2014). Extraction and characterization of silk sericin. *Indian J Fibre Text Res* 39(4), 364-372.
- [3] Kunz, R. et al. (2016). Silkworm Sericin: Properties and Biomedical Applications. *Biomed Res Int*, 1-19
- [4] Teli, M. & Rane, V. (2011). Comparative study of the degumming of Mulberry, Muga, Tasar and Ericream silk. *Fibres Text East Eur* 85(2), 10-14.
- [5] Kurioka, A., Kurioka, F. & Yamazaki, M. (2004). Characterization of Sericin Powder Prepared from Citric Acid-degraded Sericin Polypeptides of the Silkworm, *Bombyx Mori*. *Biosci Biotechnol Biochem* 68(4), 774-780.
- [6] Zhang, Y. (2014). Application of natural silk sericin protein in biomaterials. *Biotechnology Advances* 20, 91-100.
- [7] Zhaorigetu, S. et al. (2003). Inhibitory effects of silk protein, sericin on UVB-induced acute damage and tumor promotion by reducing oxidative stress in the skin of hairless mouse. *J Photochem Photobiol B Biol* 71(1), 11-17.
- [8] Kundu, S. et al. (2008). Natural protective glue protein, sericin bioengineered by silkworms: Potential for biomedical and biotechnological applications. *Prog Polym Sci* 33(10), 998-1012.
- [9] Siritienthong, T., Ratanavaraporn, J. & Aramwit, P. (2012). Development of ethyl alcohol-precipitated silk sericin/polyvinyl alcohol scaffolds for accelerated healing of full-thickness wounds. *Int J Pharm* 439(2), 175-186.
- [10] Siritientong, T. et al. (2014). Clinical potential of a silk sericin-releasing bioactive wound dressing for the treatment of split-thickness skin graft donor sites. *Pharm Res* 31(1), 104-116.
- [11] Mori, M. et al. (2016). Sponge-Like Dressings Based on the Association of Chitosan and Sericin for the Treatment of Chronic Skin Ulcers. I. Design of Experiments-Assisted Development. *J Pharm Sci* 105(3), 1180-1187.
- [12] Karahaliloglu, Z., Kilicay, E. & Denkbaz, E. (2016). Antibacterial Chitosan/Silk Sericin 3D Porous Scaffolds as a Wound Dressing Material. *Artif Cells, Nanomedicine, Biotechnol* 45(6), 1-14.
- [13] Lamboni, L. et al. (2016). Silk Sericin-Functionalized Bacterial Cellulose as a Potential Wound-Healing Biomaterial. *Biomacromolecules* 17(9), 3076-3084.
- [14] Mandal, B., Priya, A. & Kundu, S. (2009). Novel silk sericin/gelatin 3-D scaffolds and 2-D films: Fabrication and characterization for potential tissue engineering applications. *Acta Biomater* 5(8), 3007-3020.
- [15] Kanokpanont, S. et al. (2012). An innovative bi-layered wound dressing made of silk and gelatin for accelerated wound healing. *Int J Pharm* 436(2), 141-153.
- [16] Aramwit, P. et al. (2010). Formulation and characterization of silk sericin-PVA scaffold crosslinked with genipin. *Int J Biol Macromol* 47(5), 668-675.
- [17] Nayak, S., Dey, S. & Kundu, S. (2013). Skin Equivalent Tissue-Engineered Construct: Co-Cultured Fibroblasts/ Keratinocytes on 3D Matrices of Sericin Hope Cocoons. *PLoS One* 8(9), 1-17.
- [18] Dinescu, S. et al. (2013). Sericin enhances the bioperformance of collagen-based matrices preseeded with human-adipose derived stem cells (hADSCs). *Int J Mol Sci* 14(1), 1870-1889.
- [19] Nishida, A. et al. (2011). Sustained-release of protein from biodegradable sericin film, gel and sponge. *Int J Pharm* 407(2), 44-52.
- [20] Teramoto, H., Kameda, T. & Tamada, Y. (2008). Preparation of Gel Film from *Bombyx mori* Silk Sericin and Its Characterization as a Wound Dressing. *Biosci Biotechnol Biochem* 72(12), 3189-3196.
- [21] Ang-atikarnkul, P., Watthanaphanit, A. & Rujiravanit, R. (2014). Fabrication of cellulose nanofiber/chitin whisker/silk sericin bionanocomposite sponges and characterizations of their physical and biological properties. *Compos Sci Technol* 96, 88-96.
- [22] Zhang, H. et al. (2008). Preparation and characterization of a novel spongy hydrogel from aqueous *Bombyx mori* sericin. *E-Polymers* 8(66), 1-10.
- [23] Jang, M. & Um, I. (2017). Effect of sericin concentration and ethanol content on gelation behavior, rheological properties, and sponge characteristics of silk sericin. *Eur Polym J* 93, 761-774.
- [24] Barajas, J. et al. (2016). Sericin applications: a globular silk protein. *Ing y Compet* 18(2), 193-206.
- [25] Teramoto, H. & Miyazawa, M. (2005). Molecular Orientation Behavior of Silk Sericin Film as Revealed by ATR Infrared Spectroscopy, 2049-2057.
- [26] Jackson, M. & Mantsch, H. (1995). The Use and Misuse of FTIR Spectroscopy in the Determination of Protein Structure. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 30(2), 95-120.
- [27] Teramoto, H. & Mitsushiro, M. (2003).
- [28] Tretinnikov, O. (2001). Influence of Casting Temperature on the Near-Surface Structure and Wettability of Cast Silk Fibroin Films. *Langmuir* 17(23), 7406-7413.
- [29] Chimie, R., Adochitei, A. & Drochioiu, G. (2011). Rapid Characterization Of Peptide Secondary Structure By Ft-Ir Spectroscopy. *Academia Romana* 56(8), 783-791.
- [30] Kim, M. et al. (2012). Effect of Lyoprotectant on the Solubility and Structure of Silk Sericin. *Koreanstudies Information Service System* 25(1), 133-137.
- [31] Chirila, T. et al. (2013). Evaluation of silk sericin as a biomaterial: in vitro growth of human corneal limbal epithelial cells on *Bombyx mori* sericin membranes. *Prog Biomater* 2(1), 1-10.
- [32] Aramwit, P. et al. (2015). A green salt-leaching technique to produce sericin/PVA/glycerin scaffolds with distinguished characteristics for wound-dressing applications. *J Biomed Mater Res - Part B Appl. Biomater* 103(4), 915-924.
- [33] Jaramillo, N., Álvarez, C. & Restrepo, A. (2017). Structural and thermal properties of silk fibroin films obtained from cocoon and waste silk fibers as raw materials. *Procedia Eng* 200, 384-388.
- [34] Tao, W., Li, M. & Xie, R. (2005). Preparation and structure of porous silk sericin materials. *Macromol Mater Eng* 290(3), 188-194.
- [35] Jo, Y., Park, B. & Um, I. (2015). Effect of storage and drying temperature on the gelation behavior and structural characteristics of sericin. *Int J Biol Macromol* 81, 936-941.

- [36] Chollakup, R. et al. (2015). Characterization of Sericin Biomaterial from Silk Cocoon Waste. *Mater Sci Appl* 1(2), 45-50.
- [37] Lungu, A. et al. (2012). Superporous Collagen-Sericin Scaffolds. *Journal of Applied Polymer Science* 121(3), 1-11.
- [38] Rocha, L. et al. (2017). Sericin from *Bombyx mori* cocoons. Part I: Extraction and physicochemical-biological characterization for biopharmaceutical applications. *Process Biochem* 61, 163-177.
- [39] Posada, S. (2017). Desarrollo de esponjas a partir de sericina obtenida de hilos de seda. Tesis de maestría. Universidad Pontificia Bolivariana.
- [40] Colorado, A., Agudelo, C. & Moncada, A. (2013). Análisis de Biomateriales para uso en ingeniería de tejidos de piel. *Rev Ing Biomed* 7(14), 11-23.
- [41] Tobergte, D. & Curtis, S. (2013). Principles of Tissue Engineering. *Journal of Chemical Information and Modeling* 4, 230-300.
- [42] Siritientong, T., Srichana, T. & Aramwit, P. (2011). The Effect of Sterilization Methods on the Physical Properties of Silk Sericin Scaffolds. *AAPS PharmSciTech* 12(2), 771-781.

# Situación actual de la manufactura de fundiciones grises en el norte del Perú. Identificación de problemas y propuestas de mejora.

Rosalba Guerrero A.<sup>1</sup>

Jorge Iván Gómez G.<sup>2</sup>

Oscar J. Restrepo B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Piura

Piura – Perú

<sup>2,3</sup> Universidad Nacional de Colombia

Medellín – Antioquia

Aunque el Perú es un país tradicionalmente minero [1], la industria manufacturera de aleaciones no se encuentra lo suficientemente desarrollada como para satisfacer la demanda de aleaciones y piezas metálicas de la industria nacional. Esta realidad que es preocupante en la capital –donde se encuentra el mayor número y mejores industrias metalúrgicas del país– lo es mucho más en las provincias donde la capacidad de inversión en tecnología y las oportunidades de capacitación son mucho menores. En este contexto y bajo el marco del Programa Nacional Transversal de Ciencia y Tecnología de Materiales, que define entre sus líneas prioritarias “El desarrollo de materiales metálicos y procesos para darle valor agregado a los productos de la industria [1], se ha desarrollado el proyecto “Impulso de la industria manufacturera de aleaciones férreas mediante el estudio de procesos de mejoramiento de la calidad de fundiciones grises producidas en el norte del Perú, con aportes de investigadores peruanos y colombianos”, financiado por CONCYTEC, el cual busca hacer un diagnóstico de la situación de la industria manufacturera de fundiciones grises en el norte del Perú desde Piura hasta Trujillo, identificando los principales problemas tecnológicos y de gestión que presenta esta actividad industrial, así como, los factores que dificultan su despegue. Para ello, se ha trabajado con 10 pequeñas empresas fundidoras –las más representativas del norte– que han permitido el seguimiento de sus procesos y la realización de estudios metalúrgicos para determinar la calidad de las piezas que fabrican. Además, se ha realizado la caracterización de la materia prima e insumos que utilizan, pues éstos, y el modo cómo realizan sus procesos, inciden fuertemente en la calidad del producto final. Se han podido identificar los principales problemas y puntos críticos que afectan esta actividad y, a partir de éstos, se han propuesto recomendaciones y oportunidades de mejora de los procesos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fundición gris es una de las aleaciones férreas más utilizadas en la industria, para piezas con baja exigencia mecánica, pero con una alta resistencia al desgaste, abrasión y compresión; sin duda, una de sus principales ventajas es el bajo costo de producción en comparación con el acero. Las características metalúrgicas de estos materiales y la posibilidad de mejora de sus propiedades mediante la introducción de elementos de aleación, aplicación de tratamientos térmicos adecuados y el desarrollo de la fundición nodular, justifican los estudios que actualmente se realizan para hacerla más ventajosa frente a otros materiales incluyendo los aceros [2-5].

Por otro lado, dentro de la actividad manufacturera, el sector de fundición es uno de los más importantes debido a que los productos que genera son utilizados como insumos de primer orden en múltiples industrias [6]. En el contexto del desarrollo industrial, la manufactura de fundiciones férreas, tiene un impacto particular, porque constituye uno de los eslabones de la cadena siderúrgica que mantiene la dinámica económica de un país, como lo demuestran estudios sobre la incidencia de la producción de acero sobre el PBI en países de economía emergente [7], [8], [9]. En el caso del Perú, el escaso desarrollo del sector fundición es el reflejo de una economía basada en la exportación de minerales hacia países con economías de desarrollo rápido, como China e India [10], donde les dan valor agregado. La gran industria de manufactura de aleaciones es escasa y está concentrada en la capital del país, en las regiones del interior, como la del norte del Perú, son las pequeñas empresas las que sustentan esta actividad manufacturera. Por esta razón, uno de los objetivos planteados por el Estado en el Plan Bicentenario, es impulsar a la empresa peruana hacia la industrialización de materiales tanto metálicos como no metálicos [11].

En este marco, CONCYTEC está financiando el proyecto denominado: “Impulso de la industria manufacturera de aleaciones férreas mediante el estudio de procesos de mejoramiento de la calidad de fundiciones grises producidas en el norte del Perú, con aportes de investigadores peruanos y colombianos”, cuyo objetivo es impulsar a la micro y pequeña industria de la fundición del norte peruano, considerando que las MYPES son la base del tejido industrial del país, en cuanto a su contribución al crecimiento económico nacional [12] y que las MYPES de fundición son las únicas que realizan esta actividad en el norte del país. La producción de fundiciones que cumplan estándares de calidad, requiere de ciertas condiciones que impactan directamente en la calidad de las piezas obtenidas. Entre éstas es importante destacar, adecuados procesos de fabricación, obtención y uso de materia prima de calidad conocida, así como la aplicación de normas técnicas para la elaboración y control del producto obtenido.

---

<sup>1</sup> [rosalba.guerrero@udep.pe](mailto:rosalba.guerrero@udep.pe)

<sup>2</sup> [jigomezg@unal.edu.co](mailto:jigomezg@unal.edu.co)

<sup>3</sup> [ojrestre@unal.edu.co](mailto:ojrestre@unal.edu.co)

En las pequeñas empresas estas condiciones son difíciles de alcanzar, por eso, uno de los objetivos planteados en el proyecto es diagnosticar la situación en la que se encuentra esta actividad e identificar procesos de mejora que puedan implantar estos pequeños productores sin grandes inversiones pero que tengan un impacto significativo en la mejora de la calidad de los productos que ofrecen y en la rentabilidad de sus procesos. Para el estudio se han buscado talleres de fundición en las ciudades más importantes del norte del Perú desde Trujillo – a 550 Km de Lima, en la Región La Libertad, hasta Piura – a 1000 Km de Lima, pasando por Chiclayo, en la Región Lambayeque.

## **2. ACTIVIDAD INDUSTRIAL EN EL NORTE DEL PERÚ**

En los últimos años se ha producido un importante incremento de la actividad industrial en el norte del Perú. De acuerdo a datos del año 2016 del Departamento de Estudios Económicos del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), buena parte de las empresas agroindustriales, azucareras, mineras, petroleras y procesadoras de pescado y mariscos se encuentran en el norte. Concretamente, en el departamento de Piura, las ramas industriales predominantes son las de derivados pesqueros, refinación de petróleo, agroindustria e hilados de algodón, las mismas que están concentradas en el procesamiento primario de los recursos naturales de la región. Asimismo, destacan los recursos mineros no metálicos e hidrocarburos, como los fosfatos de Bayóvar, el petróleo en Talara y la industria cementera [13].

Según la Superintendencia Nacional de Administración Tributaria (SUNAT), en el año 2017, en el departamento de Piura se encontraban registradas, 6054 empresas dedicadas al sector industrial, entre grandes, pequeños y medianos contribuyentes [14, 15]; los cuales requieren piezas de fundición gris para mantener operativos sus equipos, según datos proporcionados por sus departamentos de mantenimiento y logística [16]. En la actualidad esos requerimientos son atendidos por los talleres de la capital. El departamento de Lambayeque, por su parte, concentra empresas dedicadas a la producción de azúcar y arroz. Así como, plantas procesadoras y exportadoras de café. [17]. Según SUNAT, en el departamento de Lambayeque se cuentan 2130 empresas del sector industrial entre los medianos y pequeños contribuyentes y 96 empresas, entre los principales contribuyentes [18].

En la región La Libertad, destaca la agroindustria, particularmente, el procesamiento de azúcar, el envasado de hortalizas, molienda de granos, producción de cemento, harina y aceite de pescado, además de la industria del calzado y fabricación de vehículos y autopartes, entre otros [19]. En esta región, la SUNAT, registró 8672 empresas pertenecientes al sector industrial [20, 21], de las cuales, 38 son grandes empresas, y 8634 medianas y pequeñas empresas. Al igual que las industrias de la región Piura, las de Lambayeque y La Libertad, demandan la fabricación de piezas y componentes de fundición gris para sus equipos y maquinarias, demanda que por ahora es cubierta por las fundidoras de la capital o por la exportación [16], debido a que los talleres de fundición del norte no están en la capacidad para fabricar piezas con la calidad exigida por las normas técnicas. En cuanto a la actividad específica del sector fundición y metalmecánico, la Dirección de industria de las Direcciones Regionales de Producción, revelan que esta actividad es más representativa en Trujillo y Chiclayo y menos en Piura [22, 23].

## **3. METODOLOGÍA**

Para elaborar el diagnóstico del sector fundición del norte del Perú se evaluó todo el proceso, desde la adquisición de materia prima e insumos hasta la calidad de las piezas obtenidas, pasando por la infraestructura y la gestión de las pequeñas empresas. Se consiguió la participación de 10 talleres, a los que se visitó frecuentemente para conocer sus procesos. Adicionalmente, se les pasó un cuestionario de 38 preguntas sobre caracterización general, materias primas, insumos y calidad, moldeo y control de fusión y vaciado.

Para evaluar la incidencia de la materia prima e insumos en la calidad de las piezas fundidas, se realizó la caracterización química de las chatarras y del carbono usado como combustible. Asimismo, se evaluaron las propiedades de arenas provenientes de las canteras más usadas por los fundidores. La caracterización y evaluación de la calidad de las piezas fundidas, se realizó sobre 30 muestras obtenidas de los talleres, mediante la determinación de la composición química, análisis metalográfico, análisis macrográfico para evaluación de defectos y ensayos mecánicos para determinar la Clase o Grado ASTM de las muestras.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Después de los estudios y análisis realizados, se han identificado una serie de problemas tecnológicos, así como de gestión que afectan a la industria de la fundición de la zona norte del Perú que, una vez evidenciados se pueden convertir en oportunidades de desarrollo para la región. A continuación, se resumen los problemas encontrados [24]. En la Figura 1 se muestra el resumen del trabajo realizado en el diagnóstico del sector.

### **4.1 Respecto a las etapas del proceso de fundición**

El proceso de fundición está compuesto por tres etapas principales:

- Etapa de moldeo, la misma que comprende: la fabricación de modelos y caja de moldeo, la selección y dosificación de arenas e insumos para moldeo y la preparación de arenas que se emplean en los moldes

- Etapa de fusión, que consiste en fundir la materia prima metálica en un horno para conformar una pieza específica.
- Etapa de colada, que consta del tratamiento del caldo que acaba de salir del horno y su posterior vertido en los moldes.



**Figura 1.** Proceso de fundición del norte. Diagnóstico de los principales problemas encontrados en cuando a calidad

En cada una de estas etapas se han encontrado algunos problemas que inciden en la aparición de defectos. A continuación, se detallan los más relevantes:

#### 1. Etapa de moldeo

- Inadecuado control y manejo de arenas de moldeo. La práctica habitual es usar arenas vírgenes de las canteras del norte, de las cuales no se conocen las características, o mezclar arenas usadas con arenas nuevas sin un criterio técnico para dosificarlas adecuadamente. Ello repercute en una alta incidencia de defectos superficiales y en el número de piezas rechazadas por el cliente. [25], [26]
- Diseño y fabricación inadecuados de las cajas de moldeo. Las cajas de moldeo se fabrican sin realizar un diseño sistemático de los sistemas de distribución como los canales de colada y mazarotas, las cuales se colocan empíricamente, al igual que los lastres para contrarrestar la presión metalostática, ocasionando defectos como salidas, rebabas, rechupes, etc. [26]

#### 2. Etapa de fusión

- Horno de cubilote mal diseñado y operado. El diseño de los hornos no se hace con criterio técnico y no se respetan las dimensiones que sugieren los manuales para una adecuada operación de los mismos. Los operarios no cuentan con capacitación alguna sobre el manejo y mantenimiento del cubilote, además, realizan prácticas muy riesgosas sin uso de equipos de protección personal, EPP'. [27]
- Ausencia de instrumentos de control de temperatura. No emplean pirómetros para medir la temperatura del horno, por lo que se obtiene un caldo muy frío que disminuye su fluidez al verterlo en el molde o muy caliente que produce poros y rechupes. [27]
- Inadecuados refractarios. El material refractario utilizado en los cubilotos es de carácter ácido (ladrillo de construcción de sílice), los cuales no soportan el proceso de desulfuración en el que se requiere el uso de caliza entre cargas. Por ello, es recomendable utilizar ladrillos de alta alúmina o de carácter básico, para que, al desulfurar, el refractario no se vea afectado. [27]

#### 3. Etapa de colada

- Desconocimiento de la composición química del caldo. No se diseña la carga del cubilote, es decir, no se calcula la proporción en que se agregan los diversos tipos de chatarra, en consecuencia, no se conoce la composición química aproximada del caldo que se va a obtener. De este modo, es muy poco probable que las fundiciones tengan composición química adecuada, buena calidad microestructural y propiedades según la exigencia de las normas técnicas. [26]
- Falta de aplicación de métodos de ajuste de la composición química del caldo. Debido a la falta de control del caldo no se pueden aplicar con exactitud desulfurantes o ferroaleaciones.

### 4.2 Respecto a la calidad

Un aspecto primordial en este estudio fue la determinación de la calidad de las piezas producidas en el norte del Perú y la influencia de la materia prima y los insumos empleados en su proceso.



- *Respecto a la calidad en las piezas producidas:* Las características que definen la calidad de las piezas fundidas están relacionadas con la composición química, características metalúrgicas, propiedades mecánicas, especialmente, resistencia a la tracción y la presencia o no de defectos macroscópicos en las piezas. Se ha encontrado:
  - Inadecuada composición química de la fundición gris. La falta de diseño de cargas no permite un ajuste de la composición química del caldo usando ferroaleaciones, pues no se sabe qué ajustar. Los análisis químicos muestran valores fuera de los estándares indicados en la norma ASTM A159 [28], principalmente respecto del azufre, el cual es muy pernicioso y se encuentra por encima de lo recomendado.
  - Características microestructurales de las piezas poco deseables: El tamaño y distribución de grafito no cumplen con lo indicado en la Norma UNE36117 [29], la cual recomienda grafito tipo I, distribución A y tamaños entre 5 y 6 [30]. El grafito encontrado tiene una distribución heterogénea y tamaños mayores a los indicados.

En cuanto a la matriz, suele ser perlita muy heterogénea de pobres propiedades mecánicas.

- Limitada resistencia mecánica de las piezas. La norma ASTM A48 clasifica a las fundiciones de acuerdo a su resistencia mecánica. Al analizar las muestras, se encontró que muy pocas llegan a la Clase 30, una de las más bajas indicadas por la norma. [31]
- Los defectos macro y microestructurales inducen a las fallas en servicio de las piezas. Se ha encontrado que todas las piezas presentan defectos de fusión, tales como, microrrechupes y microporos, además de arena vitrificada, rechupes, sopladuras y picaduras. [30]
- *Respecto a la materia prima e insumos:* Se han evaluado muestras de chatarra, combustible y arenas, buscando, en primer lugar, elaborar un catálogo básico de la materia prima disponible en el norte y, en segundo lugar, verificar el impacto de su calidad en las características metalúrgicas de las piezas obtenidas.
  - Composición química de las chatarras. Ante el desconocimiento de la composición química de las chatarras se ha realizado la caracterización química de algunas de las más usuales, con el fin de poder diseñar adecuadamente la carga del horno y obtener fundiciones de cierta composición química esperada. Se ha encontrado que la mayoría de chatarras tienen una composición más cercana a los estándares que las piezas fabricadas, especialmente, en cuanto al azufre que, en general, se encuentra dentro de los límites permisibles.
  - Calidad metalúrgica de las chatarras. Las características microestructurales de las chatarras son mejores que las observadas en las piezas de fundición evaluadas.
  - Exceso del contenido de azufre en el carbón. El carbón empleado contiene mucho azufre y al estar en contacto directo con la carga metálica contamina el caldo, esto explica el elevado contenido de azufre de las piezas producidas, partiendo de chatarras sin exceso de este elemento. El exceso de azufre en la fundición gris, no sólo perjudica sus propiedades, sino también, disminuye las posibilidades de una mejora de la calidad metalúrgica.
  - Caracterización de las arenas. La evaluación de propiedades de las arenas provenientes de las canteras más conocidas, revelaron que éstas no cuentan con las mínimas propiedades recomendadas por la American Foundrymen's Society - AFS para obtener piezas de buenos acabados superficiales y necesitan reformularse para que tengan mejores características.

#### **4.3 Respecto a la formación tecnológica de los fundidores**

La mayoría de fundidores contactados, han adquirido sus conocimientos de forma empírica y han afinado sus técnicas por ensayo y error. Los problemas encontrados se pueden resumir en:

- Limitada o inexistente formación tecnológica de los fundidores.
- Limitado conocimiento y aplicación de normas técnicas.
- Deficiente cultura de calidad.

Por otra parte, no hay una entidad que brinde capacitación o sirva de soporte técnico para que los acompañe en el camino hacia la inserción de la calidad en sus procesos.

#### **4.4 Respecto a la gestión de la empresa**

Se han encontrado los siguientes problemas:

- Deficiente manejo de costos.
- Insuficiente capacidad de gestión.
- Informalidad en la gestión empresarial.
- Poca atención a la salud ocupacional
- Contaminación ambiental por humos y polvos.

Estos problemas impiden el crecimiento de estos talleres.

### **5. RECOMENDACIONES Y OPORTUNIDADES DE MEJORA**

A partir de los problemas identificados en las diversas etapas del proceso [32], se proponen mejoras tecnológicas para aumentar la calidad y competitividad de los talleres involucrados en el proyecto.

## 5.1 Etapa de moldeo

En la Tabla 1, se resumen las propuestas de mejora de esta etapa, a partir de la identificación de puntos críticos y problemas encontrados en el diagnóstico del sector.

**Tabla 1.** Puntos críticos y problemas prioritarios de la etapa de moldeo del norte

Punto crítico	Problemas prioritarios	Propuestas de mejora
Inadecuado manejo y control de las arenas	Selección dosificación de arenas. Exceso de reutilización	Capacitar a los fundidores en la elaboración y uso de arenas de moldeo. Utilizar arenas beneficiadas o sintéticas (mezcla de arena silícea y arcilla –bentonita y agua).
		Capacitar en ensayos de caracterización de arena básicos: Porcentaje de arcilla en arenas, índice de finura (IF) a la arena silícea, etc.
		La arena reutilizada debe usarse sólo como relleno, previamente caracterizada y beneficiada
		Tener en cuenta las formulaciones propuestas para la preparación de la mezcla y cantidad de agua adecuada
Uso de cajas de moldeo de características no adecuadas	Las cajas se fabrican de acuerdo a criterio del moldeador, sin considerar los sistemas de alimentación.	Capacitación en técnicas para el diseño de sistemas de alimentación (mazarotas) y distribución (bebedero, respiradero y canales de colada, canales de ataque, etc.), así como, en las técnicas de fabricación y usos de cajas, modelos y moldeo.

## 5.2 Etapa de fusión y colada

En la Tabla 2, se resumen las propuestas de mejora de esta etapa, a partir de los problemas encontrados en el diagnóstico del sector.

**Tabla 2.** Puntos críticos y problemas prioritarios de la etapa de fusión y colada del norte

Punto crítico	Problemas prioritarios	Propuestas de mejora
Diseño del horno de cubilote	El diseño empírico de los hornos de cubilote no considera los mínimos parámetros que garanticen la eficiencia y rendimiento adecuados del horno.	Capacitar al dueño del taller sobre la importancia de mejorar la estructura de sus cubilotes.
	No se considera chimenea atrapa gases, emanando gases contaminantes al ambiente.	Implementar chimenea tipo sombrero chino.
Operación y mantenimiento del cubilote no adecuados.	No se utilizan EPP's para manipular el horno y los productos obtenidos.	Capacitación en cuanto al mantenimiento del horno: contar con un plan de mantenimiento en el que se incluyan mejores materiales para el revestimiento del horno (uso de recubrimientos básicos, por ejemplo). Concientizar sobre los potenciales riesgos de manipulación y operación del horno y metal fundido.
	No se realiza mantenimiento a la zona interna del cubilote, a menos que, esté completamente desgastada.	
Proporción de carga que ingresa al horno	No se hace diseño de carga que ingresa al horno.	Hacer el cálculo de cargas (sobre la base de 100Kg) en función de la calidad o norma que se desea.
Falta de control sobre tratamiento, composición y temperatura del caldo.	Defectos por falta de control de temperatura del caldo (baja temperatura produce juntas frías, alta temperatura poros y rechupes) y desulfuración.	Capacitación sobre medición de temperatura del caldo a partir de métodos empíricos o con equipos de medición (pirómetros de inmersión, termocuplas, etc.) y otras técnicas, como: aumentar la cama de combustible si se necesita mayor temperatura.

## 5.3 Calidad de piezas de fundición gris laminar

Las piezas de fundición que se fabrican en el norte del Perú cumplen, escasamente, con las normas técnicas para fundiciones, debido al desconocimiento por parte del fabricante y la poca exigencia por parte del cliente. Este problema repercute en el crecimiento de su negocio, puesto que se ven obligados a rechazar a clientes grandes que buscan calidad y requieren piezas de Clase estándar. En la Tabla 3 se muestra el resumen de los puntos críticos y las acciones recomendables que deben ser aplicadas para mejorar la calidad de sus productos.

## 5.4 Gestión de la empresa

Los talleres visitados muestran características similares en cuanto al personal, instalaciones, distribución de áreas de trabajo y la seguridad industrial, asimismo, todas las dificultades que presentan las micro y pequeñas empresas:

- Baja productividad, debido a la correlación positiva entre tamaño de la empresa y productividad.
- Bajo volumen de ventas, el cual, de acuerdo a SUNAT, también sigue una correlación positiva respecto al tamaño de las empresas.
- Escasa inserción en el mercado externo.
- Empleo de baja calidad.
- Mala utilización de la tecnología y débil gestión empresarial.

En la Tabla 4, las recomendaciones están dirigidas, principalmente, a la concientización a través de la capacitación de los gerentes y trabajadores de las empresas.

**Tabla 3.** Puntos críticos y problemas prioritarios de la calidad de piezas y de la materia prima metálica e insumos

Punto crítico	Problemas prioritarios	Propuestas de mejora
<b>PIEZAS DE FUNDICIÓN</b>		
Falta de aplicación de normas técnicas	Ninguna de las piezas fundidas caracterizadas es estándar según la ASTM A48. En algunos casos, por tracción sólo para piezas de resistencia moderada (clase 30). No hay repetibilidad entre una y otra colada.	Capacitar al gerente y personal en general sobre la importancia del cumplimiento de los estándares de calidad.  Gestionar la creación de un laboratorio que les acompañe en la familiarización con los estándares de calidad, realice los ensayos que verifiquen la misma y los capacite técnicamente.
	No se conoce la composición química del caldo y no se obtienen piezas fundidas estándares.	Capacitar al personal en pruebas normalizadas como la que indica la norma ASTM A367 para controlar la calidad de las piezas de acuerdo a su composición química y otras técnicas empíricas.  Capacitar sobre el uso de eutéctómetros y espectómetros, equipos de determinación de la composición química del caldo de colada obtenido. Ajustar la composición del caldo con el uso de ferroaleaciones
Alta incidencia de defectos	Defectos a nivel macro y microscópicos, micro-segregaciones y tendencia al blanqueo.	Capacitar técnicamente al personal sobre los aspectos involucrados en la incidencia de defectos.
		Contar con un manual de buenas prácticas y normas traducidas para que sirvan de guía en su proceso de fundición.
<b>MATERIA PRIMA METÁLICA E INSUMOS</b>		
Falta de catalogación de chatarras en el norte del Perú	Desconocimiento sobre el tipo de materia prima metálica que ingresa al cubilote de acuerdo a su composición química.	Análisis de chatarra representativa empleada por los talleres del norte del Perú.  Elaborar un catálogo de materia prima metálica representativa en el norte.
		Capacitación en cuanto a la selección de materia prima utilizando el catálogo de chatarra representativa del norte.  Tener siempre retornos del mismo material que se va a fundir con el fin de obtener una composición química pura, en la medida de lo posible.
Selección de chatarra empleada	La chatarra es seleccionada empíricamente.	Emplear antracita con menor contenido de azufre disponible en la zona. Por ejemplo, en Trujillo.
Adquisición de carbón como combustible	Exceso de azufre en carbón.	Gestionar entre varias empresas del norte la compra de coque en el exterior para reducir al mínimo el contenido de azufre del caldo.

**Tabla 4.** Puntos críticos y problemas prioritarios de la gestión de la empresa del norte

Puntos crítico	Problemas prioritarios	Propuestas de mejora
Desconocimiento de la estructura de costos de la empresa e informalidad.	No se conoce, con precisión, la estructura de costos de la empresa.	Capacitación de los dueños de los talleres de fundición del norte a cargo de profesionales expertos en la micro y pequeña empresa sobre las ventajas de la formalización.
	La mayoría de empresas no son formales, por temor a la fiscalización del estado.	
Falta de cultura de prevención de accidentes.	Peligro de accidentes laborales por no usar, siempre, los EPP's y por la distribución inadecuada de espacios de trabajo y falta de señalización.	Capacitar a los gerentes y personal en general sobre los potenciales riesgos en su área de trabajo y por la mala distribución de la misma.
Mano de obra no calificada	Se contrata mano de obra local no capacitada.	Incitar a los gerentes a capacitarse y capacitar y continuamente a su personal en cuanto al aspecto técnico de sus operaciones para mejorar la eficiencia de su empresa.

## 6. CONCLUSIONES

El sector fundición del norte se caracteriza por ser empírico y poco tecnificado. Los procesos que realizan presentan importantes falencias que inciden en la baja calidad de los productos que ofrecen. No hay un adecuado manejo de las arenas de moldeo, hay desconocimiento de las características de la materia prima e insumos utilizados y las piezas producidas presentan defectos que merman sus propiedades. Todo esto debido principalmente al poco conocimiento de aspectos básicos de la metalurgia de las fundiciones y escasa capacitación de los operarios en las diversas partes del proceso de fundición. Sin embargo, aún con los equipos e instalaciones sencillas con que cuentan las empresas fundidoras norteñas, son capaces de obtener piezas de mediana exigencia alcanzando, al menos, la Clase 30 según la norma ASTM.

No obstante, la demanda de piezas de fundición por las industrias del norte, las empresas fundidoras tienen un mercado limitado y poca capacidad de inversión en tecnología. El incremento de su oferta de productos está

condicionado a una mejora de su calidad, lo cual a su vez depende de factores tanto tecnológicos como de capacitación y económicos.

Los operarios y gerentes de las empresas fundidoras estudiadas, presentan una precaria formación tecnológica y administrativa, haciendo necesario el diseño de programas de capacitación orientados específicamente a fortalecerlos, tanto desde el punto de vista técnico como de gestión.

Es necesario alentar y facilitar la agrupación de los pequeños fundidores para que les sea más fácil la adquisición de materia prima de calidad y el acceso a los posibles programas de ayuda que ofrezca el estado peruano.

El mejoramiento de la calidad de las piezas producidas en el norte necesita de la presencia de instituciones que les brinden el soporte técnico que implica la mejora. En este sentido, es también importante fortalecer los pocos centros que puedan brindar este apoyo tecnológico.

La actividad manufacturera de aleaciones y la constatación de la demanda de piezas fundidas de calidad en el norte, ofrecen oportunidades de investigación y desarrollo que deben estar sustentadas por las universidades e instituciones del estado que buscan impulsar el desarrollo industrial del país y la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

### **Agradecimientos**

Se hace un especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por el financiamiento del proyecto: "IMPULSO DE LA INDUSTRI A MANUFACTURERA DE ALEACIONES FÉRREAS MEDIANTE EL ESTUDIO DE PROCESOS DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE FUNDICIONES GRISES PRODUCIDAS EN EL NORTE DEL PERÚ", Convenio N°217 - 2015 - FONDECYT - DE.

## REFERENCIAS

- [1] CONCYTEC (2016). Programa Nacional Transversal de Ciencia y Tecnología de Materiales. Programas Nacionales.
- [2] Basso, A. et al. (2012). High silicon ductile iron: possible uses in the production of parts with “dual phase ADI” microstructure. *ISIJ International* 52(6), 1130–1134.
- [3] Lacaze, J. et al. (2012). Influence of 1 wt-% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons. *Material Science and Technology* 30(12), 1425-1431
- [4] Ojo, S. & Riposan, I. (2012). Alloy selection for in mould inoculation to control chill width in ductile iron. *Materials Science and Technology* 28(5), 576–581.
- [5] Franco, J., & Madre, M. (s.f.). Tratamientos de fundiciones de hierro. *Metalografía y tratamientos térmicos*.
- [6] ODES (2005). Diagnóstico Integral del Sector fundición en el departamento del Atlántico. Corporación Autónoma Regional del Atlántico.
- [7] Dobrota, G. & Caruntu, C. (2013). The analysis of the correlation between the economic growth and crude steel production in the period 1991-2011. *Metalurgia* 52(3), 425–428.
- [8] Ghosh, S. (2006). Steel consumption and economic growth: Evidence from India. *Resources Policy* 31(1), 7–11.
- [9] Kwang, H. (2005). Steel consumption and economic growth in Korea: Long-term and short-term evidence. *Resources Policy* 36(2), 107–113.
- [10] SINACYT (2006). Plan Nacional Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Competitividad y el Desarrollo Humano 2006 – 2021.
- [11] Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (2011). [El Perú hacia el 2021](#). Online [Jan 2018].
- [12] Ibarra, M., González, L. & Demuner, M. (2006). Competitividad empresarial de las pequeñas y medianas empresas manufactureras de Baja California. *Estudios Fronterizos* 18(35), 35-43.
- [13] Banco Central de la Reserva del Perú (2016). [Caracterización del departamento de Piura](#). Online [Jan 2018].
- [14] SUNAT (2017). [Relación de MEPECOS del departamento de Piura](#). Online [Feb 2018].
- [15] SUNAT (2017). [Relación de PRICOS del departamento de Piura](#). Online [Feb 2018].
- [16] CONCYTEC (2017). [Informe de requerimientos de piezas de fundición gris esferoidal en el norte del Perú](#). Universidad de Piura.
- [17] Banco Central de la Reserva del Perú (2016). [Caracterización del departamento Lambayeque](#). Online [Feb 2018].
- [18] SUNAT (2018). [PRICOS y MEPECOS de Lambayeque](#). Online [Jan 2018].
- [19] Banco Central de la Reserva del Perú (2016). [Caracterización del departamento de La Libertad](#). Online [Feb 2018].
- [20] SUNAT (2017). [Relación de MEPECOS del departamento de La Libertad](#). Online [Jan 2018].
- [21] SUNAT (2017). [Relación de PRICOS del departamento de La Libertad](#). Online [Jan 2018].
- [22] Dirección Regional de la Producción (2017). [Relación de empresas manufactureras de Piura](#). Online [Feb 2018].
- [23] Dirección Regional de la Producción (2017). [Relación de empresas manufactureras de Trujillo](#). Online [Feb 2018].
- [24] CONCYTEC (2018). [Diagnóstico del sector fundición del norte del Perú](#). Online [Jan 2018].
- [25] AFS (1995). Manual de ensayos de arenas de fundición.
- [26] AFS (1995). Atlas Internacional de Defectos de Fundición.
- [27] Baquero, A. (2000). Diseño, operación y control de cubilote. Universidad Industrial de Santander.
- [28] American Society of Materials (2015). ASTM A159: Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings.
- [29] UNE (1963). UNE 36 117: Tipos y tamaños de grafito.
- [30] ASM Handbook. Castings. ASM International.
- [31] American Society of Materials (2016). ASTM A48: Standard Specification for Gray Iron Castings.
- [32] COLCIENCIAS (1993). Inventario de problemas y oportunidades tecnológicas. *Revista Antioqueña de Economía y desarrollo* 5, 44–52.

# Efecto de la fragilización por hidrógeno gaseoso sobre las propiedades mecánicas de un acero microaleado tratado térmicamente

Julio C. Villalobos<sup>1</sup>

Sergio Serna<sup>2</sup>

Bernardo Campillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Morelia  
Morelia – México

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias aplicadas  
Cuernavaca – México

<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad de México – México

El objetivo principal de este trabajo es determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno gaseoso y el efecto en las propiedades mecánicas de un acero microaleado experimental sujeto a tratamientos térmicos con diferentes velocidades de enfriamiento. El acero microaleado en su condición inicial fue calentado hasta los 900 °C y enfriado en rocío de agua (9.11 °C/s), aire a presión (11.6 °C/s) y una mezcla de agua-10% aceite; y calentado a 820 °C y enfriado en aceite (21.3 °C/s). Para determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno, ensayos de microdureza e impacto Charpy-V fueron llevados a cabo en una atmósfera de gas de hidrógeno a presiones de 1, 7 y 10 MPa. Los resultados mostraron una alta susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno gaseoso con el incremento de la presión aplicada, reduciendo sus valores de microdureza y tenacidad al impacto en todas las condiciones de tratamiento térmico; siendo la condición más susceptible en la muestra enfriada en aire a presión.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el hidrógeno se ha convertido en una fuente de energía alterna muy importante como reemplazo de los combustibles fósiles, con la finalidad de disminuir las emisiones de efecto invernadero y la contaminación del aire [1]. El reto principal que se enfrenta en la actualidad es como producirlo, transportarlo y almacenarlo. Una forma segura de almacenar hidrógeno a alta presión (70 MPa) es mediante la utilización de aceros microaleados de alta resistencia debido a que presentan una buena combinación de propiedades mecánicas obtenidas durante su procesamiento termomecánico [2], favoreciendo la obtención de microestructuras con la presencia de martensita, bainita y ferrita acicular, con lo que pueden alcanzar esfuerzos de cedencia (YS) por arriba de los 800 MPa [3][4]. Esto permite reducir los costos de producción reduciendo los espesores de pared empleadas en los recipientes de almacenamiento utilizados [5]. Sin embargo, los aceros de alta resistencia son susceptibles al fenómeno de fragilización por hidrógeno, debido a que estas microestructuras presentan una alta difusividad de hidrógeno afectando las propiedades mecánicas del acero, siendo la principal característica la disminución en la ductilidad (%E), reducción de área (%RA), y falla frágil con esfuerzos aplicados por debajo de YS [6][7].

Los principales factores que incrementan la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno están asociados con la cantidad de hidrógeno absorbido en función de la presión aplicada en los dispositivos de almacenamiento. Las altas presiones favorecen un alto gradiente de concentración superficial, incrementando la adsorción y absorción de hidrógeno atómico [8]. Además, un factor importante a considerar es la cinética de difusión dentro de la red cristalina, así como la interacción del hidrógeno atómico con los defectos cristalinos del acero, tales como precipitados, dislocaciones, límites de grano, etc. Así como el nivel de carga aplicado, provocando los efectos mencionados anteriormente [9].

El efecto de fragilización por hidrógeno a bajas presiones (1 - 7 MPa) ha sido poco estudiado en aceros de alta resistencia, además, los mecanismos de fragilización no han sido claramente establecidos, por lo que es importante determinar en qué condiciones microestructurales y de presión aplicada, se presenta una mayor afectación en las propiedades mecánicas de los aceros de alta resistencia. El presente trabajo de investigación se llevaron a cabo ensayos de microdureza Vickers y ensayos Charpy-V, en su condición de llegada y cargadas con hidrógeno a presiones de 1 - 7 MPa durante tiempos de permanencia de 1 hora. Con esto se pretende correlacionar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno en función de la presión aplicada y el tipo de microestructuras obtenidas en función de su velocidad de enfriamiento.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El acero microaleado utilizado en el presente trabajo de investigación, fue procesado termomecánicamente a partir de una placa de 100 x 48 x 38 mm de dimensión. Esta fue calentada a 1200 °C en la región de austenita durante 6 horas antes del proceso de laminación. Una laminación inicial se realizó por arriba de las temperaturas críticas  $A_1$  -

---

<sup>1</sup> julio.villalobos@uaem.mx

<sup>2</sup> aserna@uaem.mx

<sup>3</sup> bci@fis.unam.mx

A<sub>3</sub> a 1150 °C con una reducción de 100 a 35 mm, posteriormente a los 850 °C se realizó una laminación final con una reducción de 35 a 15 mm de espesor final y enfriamiento al aire. En esta condición fue recalentado hasta los 900 °C y enfriado aceleradamente en agua para obtener una microestructura martensítica – bainítica. En la Figura 1 se muestra el diagrama del proceso termomecánico al que el acero fue sometido.

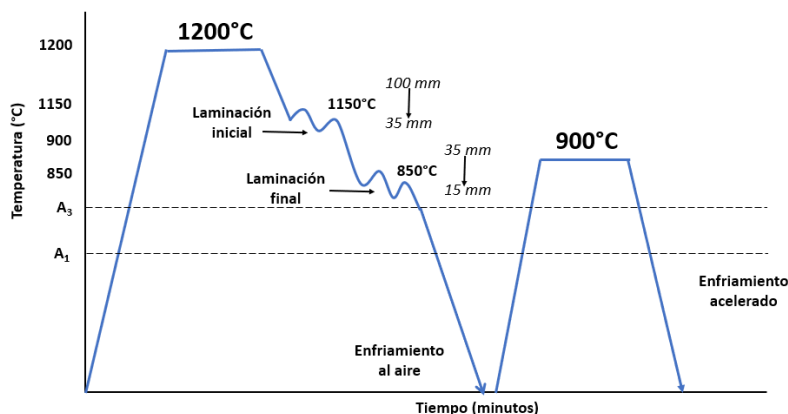


Figura 1. Esquema del procesamiento termomecánico del acero microaleado experimental

## 2.1 Composición química

Para determinar la composición química del acero procesado termomecánicamente, se utilizó un espectrómetro de emisión de chispa. En la Tabla 1 se muestra la composición química del acero microaleado. Se destaca un bajo contenido de C y la presencia de elementos microaleantes tales como Nb, Ti, Mo y Cr que tienen una fuerte tendencia a formar carburos y/o carbonitruros durante el procesamiento termomecánico o durante tratamientos térmicos posteriores, modificando así las propiedades mecánicas finales.

Tabla 1. Composición química del acero microaleado (% en peso)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	Ti
0.027	0.244	1.00	0.003	0.005	0.422	0.180	1.35	0.045	0.024	0.015

## 2.2 Tratamientos térmicos

El acero microaleado fue sometido a una serie de tratamientos térmicos y enfriamientos en distintos medios para la obtención de distintas microestructuras y determinar el efecto microestructural en la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno. Para esto se realizó un calentamiento de homogenización por arriba de las temperaturas críticas A<sub>1</sub> – A<sub>3</sub> (zona austenítica) a una temperatura de 900 °C durante 20 minutos, utilizando como medios de enfriamiento aire a presión, rocío de agua y una mezcla de agua – 10% aceite. Otro calentamiento de homogenización se realizó entre las temperaturas críticas A<sub>1</sub> – A<sub>3</sub> (zona bifásica) a una temperatura de 820 °C durante 20 minutos, utilizando como medio de enfriamiento aceite. Estos tratamientos térmicos fueron seleccionados debido a que análisis preliminares se determinó que la rapidez de enfriamiento de estos medios favorece la formación de microestructuras complejas compuestas por martensita, bainita y ferrita acicular. Estos procesos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Temperatura de austenitización y medio de enfriamiento empleado en los tratamientos térmicos del acero microaleado

Temperatura de austenitización (°C)	Medio de enfriamiento
820	Aceite
900	Rocío de agua
900	Aire a presión
900	Agua – 10% aceite

## 2.3 Carga gaseosa de hidrógeno

La carga gaseosa de hidrógeno se llevó a cabo utilizando una celda diseñada para exponer a un ambiente de hidrógeno gaseoso a las probetas destinadas para ensayos de microdureza Vickers y Charpy-V (ver Figura 2a). Este dispositivo de carga fue diseñado para soportar una presión hidrostática máxima de 17.25 MPa de hidrógeno, sin embargo, las presiones utilizadas para realizar los ensayos in-situ fueron realizadas a baja presión, siendo éstas a 1, 4 y 7 MPa.

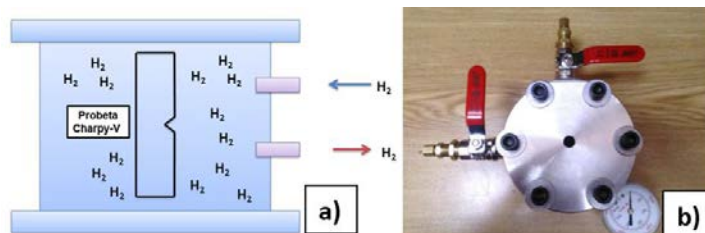


Figura 2. a) Esquema de la carga gaseosa de hidrógeno, b) celda diseñada para la realización del cargado

La celda cuenta con dos válvulas de acero inoxidable 316L, una se conecta a un tanque de hidrógeno que cuenta con un regulador de alta presión para ajustar la presión requerida dentro de la celda; y la otra válvula es conectada a una bomba de vacío para retirar el aire remanente (ver Figura 2b). Las probetas de microdureza y Charpy-V se colocaron dentro de la celda previamente, y una vez alcanzada la presión de trabajo, esta es sellada hasta alcanzar un tiempo de carga de 1 hora. Posteriormente, la celda es descargada e inmediatamente después se realizaron los ensayos mecánicos. El hidrógeno utilizado fue de grado cromatográfico con una pureza de 99.998%.

## 2.4 Ensayos mecánicos

Para la realización de las pruebas de microdureza Vickers, se utilizó un microdurómetro Matzuzawa Seico MHT2. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando un indentador de diamante de forma piramidal de base cuadrada, se empleó una carga de 1Kgf durante 15 segundos. Se realizaron 5 mediciones en la superficie de las probetas previamente pulidas a “espejo”, en dirección longitudinal a la laminación. Los ensayos fueron llevados a cabo de acuerdo a la Norma ASTM E384 [10].

Para determinar la tenacidad al impacto se realizaron ensayos de Impacto Charpy-V utilizando una máquina de péndulo universal Mohr & Federhaff, de acuerdo a la Norma ASTM E23 [11] para determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno y tenacidad en las probetas cargadas con hidrógeno gaseoso. Las pruebas fueron realizadas inmediatamente después de realizada la carga, y posteriormente se analizó el porcentaje de fractura fibrosa para determinar el tipo de fractura predominante en cada condición de enfriamiento y presión aplicada.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización microestructural

En la Figura 3 se muestra la micrografía de la microestructura del acero en su condición de llegada obtenida mediante SEM a 1000x. Esta se reveló utilizando Nital 2% como reactivo de ataque; en esta figura se observa una microestructura compuesta por martensita (M) – bainita (B) principalmente, con trazas de ferrita acicular (FA). Se observan también algunos cambios de orientación que están enmarcados por los límites de grano. La microestructura obtenida es producto del proceso de laminación controlada, que se realizó por arriba de las temperaturas críticas de transformación ( $A_1$  y  $A_3$ ), y un enfriamiento acelerado posterior. Por la presencia de elementos tales como Mo y Ni, contribuyen a un incremento de su templabilidad, propiciando la formación de microconstituyentes martensíticos (M/A).

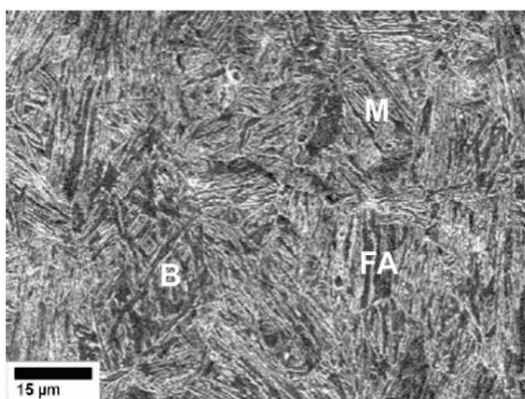


Figura 3. Microestructura del acero en condición de llegada

La Figura 4a corresponde la micrografía del acero templado en aire a presión a partir de una temperatura de 900 °C. Se puede observar una microestructura constituida principalmente por trazas de B y FA en una matriz de ferrita (F), estos microconstituyentes presentan diferentes orientaciones delimitadas por las fronteras de grano austenítico primario. A estos aumentos no se observan claramente la presencia de precipitados. La micrografía obtenida del tratamiento de templado en aceite a partir de una temperatura de 820 °C se muestra en la figura 4b. Se puede observar una microestructura bandeada compuesta principalmente por M - FA sobre una matriz de ferrita poligonal (FP). Los tamaños de grano de la FP oscilaron en un rango de 15 a 29 µm, presentando diferentes orientaciones, y niveles de elongación. La figura 4c corresponde a la micrografía del acero templado en rocío de agua. Se puede observar una microestructura formada principalmente por agujas de M y B, con distintas orientaciones delimitadas por la frontera de grano, esta formación de M/A se debe a una mayor velocidad de enfriamiento. Se observan algunas zonas con la presencia de austenita retenida (AR) y algunos finos precipitados distribuidos entre las agujas de M, creándose algunas interfaces M/A. La micrografía del acero templado en una emulsión de agua – aceite a partir de una temperatura de 900 °C, se muestra en la figura 4d. Se observa una microestructura compuesta por M, B y FA. Se puede notar que las agujas de M - B son más finas y presentan un espacio interlaminar menor en comparación con las microestructuras descritas anteriormente. La rapidez de enfriamiento de cada medio se resume en la figura 5, siendo la mayor rapidez obtenida en una mezcla de agua – aceite con un valor de 21.5 °C/s; la menor rapidez de enfriamiento se registró utilizando aire a presión con un valor de 9 °C/s.



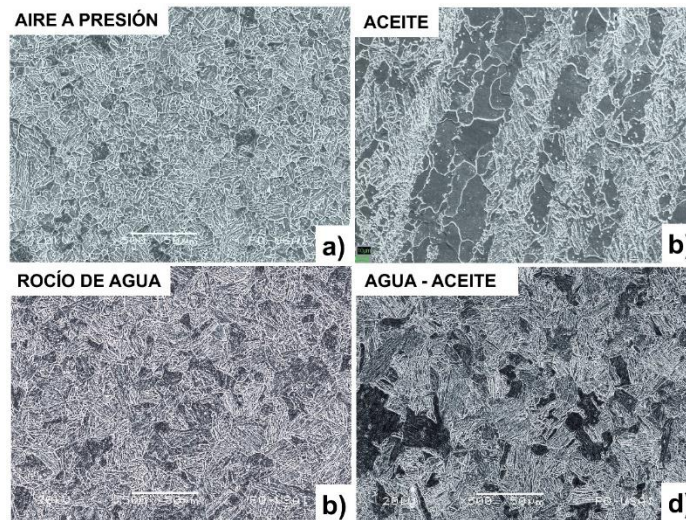


Figura 4. Microestructuras del acero en función del medio de enfriamiento utilizado

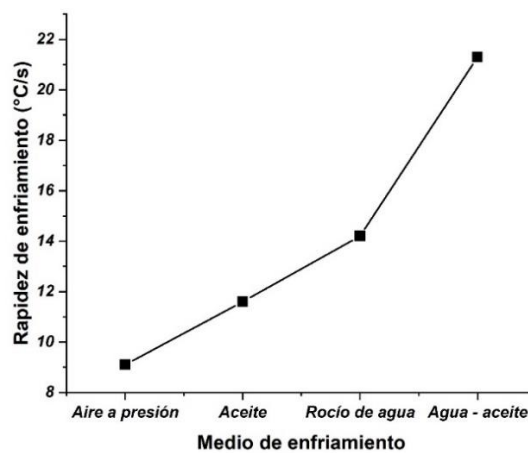


Figura 5. Rapidez de enfriamiento en función del medio utilizado

### 3.2 Propiedades mecánicas iniciales

En las Figuras 6a y 6b se muestran las microdurezas y energía absorbida obtenidas en el acero microaleado en su condición de llegada y en función del medio de enfriamiento utilizado. Se puede observar que el acero en su condición de llegada presenta una microdureza de 405 HV, sin embargo, su tenacidad al impacto es de apenas 40 J. Esto debido a la microestructura generada por el procesamiento termomecánico y una alta velocidad de enfriamiento, propiciando una mayor presencia de martensita y bainita. Utilizando como medio de enfriamiento aire a presión, se obtuvo una microdureza de 275 HV, siendo esta la microestructura más blanda, comparada con los otros medios de enfriamiento. La rapidez de enfriamiento es muy lenta para propiciar la formación de martensita, dando como resultado una tenacidad a temperatura ambiente de 196 J, siendo la más elevada en comparación con los otros medios de enfriamiento.

La condición de enfriamiento en aceite presentó valores de microdureza de 288 HV y una energía absorbida de 149 J. Siendo esta condición la que presentó una buena combinación de propiedades mecánicas, entre ductilidad y resistencia. El tipo de microestructuras generado se obtuvo debido a que la temperatura de austenitización a partir de la cual se realizó el enfriamiento, fue de 820 °C, entre las temperaturas críticas  $A_1 - A_3$ , sin que hubiera una completa transformación austenítica. La presencia de precipitados podría deberse a la baja temperatura de austenitización, donde posiblemente no hubo disolución de precipitados, algunos precipitados de NbC y TiN se ha reportado que presentan temperaturas de solubilidad por arriba de los 1068 y 1389°C, respectivamente [12].

Utilizando como medio de enfriamiento rocío de agua se obtuvo una microdureza de 330 HV y una energía absorbida de 174 J. La alta microdureza y alta tenacidad se obtuvo posiblemente a la formación de austenita retenida y algunos finos precipitados distribuidos en las agujas de martensita, propiciada por una velocidad intermedia de enfriamiento, en comparación con los otros medios de enfriamiento. La rapidez de enfriamiento más alta se presentó utilizando como medio de enfriamiento una mezcla de agua-aceite siendo su valor de 21.3 °C/s. Esto propició una mayor formación de microconstituyentes martensíticos, ocasionando un incremento en su valor de microdureza con valores de 362 HV. Sin embargo, su tenacidad al impacto disminuye considerablemente, presentando una energía absorbida de 84 J.

Es importante mencionar de manera general, que la realización de los tratamientos térmicos incrementa considerablemente la tenacidad del acero microaleado manteniendo sus valores de microdureza en valores que oscilaron entre los 250 y 350 HV. Indicando una buena combinación de propiedades mecánicas en comparación con el acero en su condición de llegada.

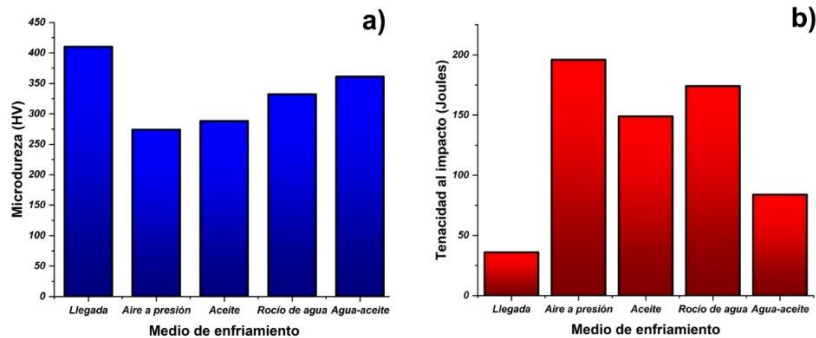


Figura 6. Propiedades mecánicas iniciales, a) microdureza Vickers, b) tenacidad al impacto

### 3.3 Efecto del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas

En la Figura 7 se muestran los valores de microdureza Vickers obtenidos a partir del acero en su condición de llegada (sin tratamiento térmico), en función de la presión de hidrógeno aplicada (1, 4 y 7 MPa), así como del tiempo de carga (1 y 12 horas). Analizando la presión aplicada, de manera independiente al tiempo de carga, se puede observar que, al incrementar la presión de hidrógeno, se obtiene un cambio en los valores de microdureza del acero, desde los 382 hasta los 292 HV, una reducción total del 24%. Sin embargo, el mayor cambio se presenta a una presión aplicada de 1 MPa con valores obtenidos de 340 HV, aproximadamente una reducción del 11%, comparada con la condición inicial. A una presión aplicada de 4 y 7 MPa, se produce una menor reducción en la microdureza con relación a la presión de 1 MPa, con valores obtenidos de 315 y 292 HV respectivamente. El incremento en el tiempo de carga gaseosa (12 horas) tiende a reducir la microdureza, sin embargo, la condición donde se presenta un mayor cambio en los valores de microdureza se obtiene a 1 hora, en todas las presiones aplicadas de hidrógeno. De manera comparativa se presenta el efecto del tiempo en la condición de carga electrolítica, se puede observar que el incremento del tiempo también genera una reducción en la microdureza, sin embargo, este comportamiento se presenta de manera lineal.

De acuerdo con la ley de Sievert [13], existe una relación directa entre la presión aplicada y la concentración de hidrógeno en la superficie del acero. Esto es, al incrementar la presión aplicada, el gradiente de concentración superficial será mayor, por lo tanto, habrá una mayor cantidad de hidrógeno presente, que difundirá al interior de la red cristalina del acero. Esto, aunado a una microestructura susceptible del tipo martensítica – bainítica, y factores microestructurales como una alta densidad de dislocaciones y a la presencia de partículas de segunda fase, todo esto contribuye a generar un incremento en la susceptibilidad a la fragilización a 7 MPa y 12 horas de carga gaseosa.

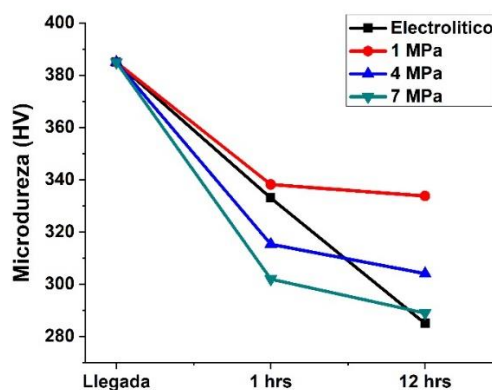
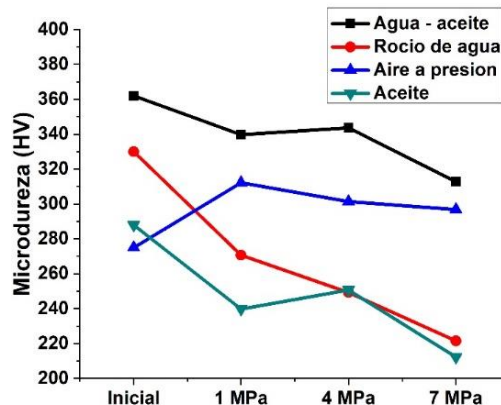


Figura 7. Efecto de la presión y el tiempo sobre la microdureza en la condición de llegada

La Figura 8 representa la microdureza obtenida para el acero microaleado en su condición de temple en distintos medios de enfriamiento, cargadas con hidrógeno a presiones de 1, 4 y 7 MPa, durante un tiempo de 1 hora. Se puede observar de manera general que la curva de microdureza en el medio de enfriamiento de agua – aceite, presenta una mayor microdureza en todas las condiciones de presión aplicada en relación a los otros medios de enfriamiento. La condición que presenta una menor curva de microdureza es la condición de enfriamiento en aceite. Independientemente de la presión de hidrógeno aplicada, este efecto se debe a la velocidad de enfriamiento que se aplicó durante el proceso de templado, así como la microestructura predominante, tal como se describió anteriormente.

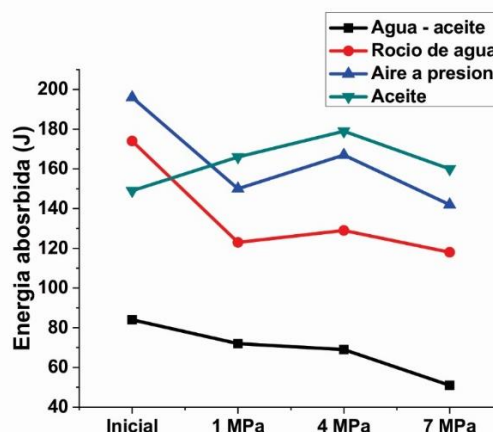
A una presión aplicada de 1 MPa, la microdureza tiende a disminuir sus valores en las condiciones de templado en agua – aceite, aceite y rocío de agua, con cambios de 22, 48 y 59 HV respectivamente, en relación a su condición inicial (sin presión aplicada). Cuando se aplica una presión de 4 MPa, las condiciones de enfriamiento en agua – aceite y aceite, presentan una ligera recuperación en sus valores de microdureza, este efecto no se presenta en la condición de enfriamiento de rocío de agua. La mayor disminución de microdureza se presenta a una presión aplicada de 7 MPa, para las tres condiciones mencionadas anteriormente. Sin embargo, la más susceptible al efecto de la presión de hidrógeno es la condición de rocío de agua, con una disminución de 110 HV en relación a su condición inicial, generando un porcentaje de reducción total de 33 %. La condición menos susceptible al efecto de la presión es la condición de agua – aceite, con una reducción total de 48 HV, que representa una reducción de 13.5 %. Por otro lado, la condición de enfriamiento en aire a presión, no muestra una tendencia a disminuir sus valores de microdureza, contrariamente a la tendencia observada por las demás condiciones de enfriamiento, se observa un ligero incremento en sus valores de microdureza a 1 MPa de presión y este comportamiento se mantiene hasta los 7 MPa de presión aplicada.



**Figura 8.** Efecto de la presión de hidrógeno en la microdureza del acero microaleado tratado térmicamente

La Figura 9 representa las curvas de energía absorbida obtenidas a partir de los ensayos de impacto Charpy – V, en las distintas condiciones de enfriamiento, en función de la presión de hidrógeno aplicada. De manera general se puede observar que la condición de enfriamiento en aceite presenta una mayor tenacidad, y la que presenta una menor tenacidad al impacto, es la condición de agua – aceite, esto debido al tipo de microestructura predominante en ambas condiciones.

Analizando el efecto de la presión de hidrógeno en la tenacidad al impacto, se observa que la energía absorbida en las condiciones de agua – aceite, aire a presión y rocío de agua tienden a disminuir a 1 MPa de presión, con reducciones de 13, 46 y 51 J respectivamente, con relación a su condición inicial sin exposición a medio gaseoso. Con el incremento de la presión a 4 MPa, se presenta una recuperación en la tenacidad al impacto en las condiciones antes mencionadas (con excepción de la condición de agua – aceite), para disminuir posteriormente sus valores de microdureza a una presión de 7 MPa, estas reducciones representan una caída total de tenacidad de alrededor de 31, 52 y 54 J, para el mismo orden mencionado, siendo la condición más susceptible a la pérdida de tenacidad es la condición de aire a presión. La condición de templado en aceite presenta un incremento en sus valores de microdureza a una presión de 1 y 4 MPa, y tiende a reducir sus valores de tenacidad a 7 MPa, siendo esta la condición que menos afecta su tenacidad por efecto del hidrógeno.



**Figura 9.** Efecto de la presión de hidrógeno en la tenacidad al impacto del acero microaleado tratado térmicamente

Anteriormente, el tipo de microestructura más utilizadas para el transporte y almacenamiento de hidrocarburos ha sido del tipo P – F, sin embargo, este tipo de microestructuras no son adecuadas para los requerimientos actuales que exigen una combinación de propiedades mecánicas, principalmente una alta resistencia y buena tenacidad [14]. En respuesta a estos requerimientos, en los últimos años se ha implementado el uso de aceros microaleados con microestructuras complejas formadas por M – B – FA, que puede alcanzar esfuerzos de fluencia por arriba de los 700 MPa y una tenacidad al impacto por arriba de los 93 J [16]. Debido a esto, el criterio de selección de las temperaturas de homogenización y medios de enfriamiento consistió en aquellos que generan microestructuras complejas compuestas por M, B, FA y con microdurezas por arriba de los 280 HV y con una tenacidad al impacto mayor a los 90 J. A partir de los tratamientos térmicos de homogenización y templado del acero microaleado, en los distintos medios de enfriamiento se obtuvo una variedad de microestructuras compuestas principalmente por F, F - P, F - M, M - FA, M – B – FA, con un rango de microdurezas desde los 228 hasta los 362 HV.

El comportamiento de la microdureza y la tenacidad en función de la presión de hidrógeno aplicada se debe principalmente a las características microestructurales obtenidas en cada condición de enfriamiento, así como del tipo y la cantidad de trampas de hidrógeno presentes. Una de las características principales del fenómeno de fragilización por hidrógeno, es la pérdida de microdureza y tenacidad [16], tal como se presenta en las condiciones de enfriamiento en agua – aceite y rocío de agua. Estas condiciones de enfriamiento generaron microestructuras del tipo bainíticas – martensíticas con espacios interlaminares pequeños entre los listones de M y B. Este tipo de microestructuras son más susceptibles al fenómeno de fragilización por hidrógeno debido a que presentan una mayor cantidad de dislocaciones, así como un mayor empaquetamiento entre los M/A [17]. Además, el incremento en la presión de hidrógeno favorece una mayor cobertura de hidrógeno superficial, lo que propicia una mayor velocidad de absorción y difusión en la red cristalina del acero, siendo las más susceptibles aquellas que presentan una mayor velocidad de enfriamiento propiciando la formación de microestructuras martensíticas.

#### **4. CONCLUSIONES**

- La microestructura del acero microaleado en su condición inicial estuvo compuesta por martensita – bainita con trazas de ferrita acicular, generando una alta microdureza y tenacidad al impacto.
- Los tratamientos térmicos con enfriamiento acelerado generaron microestructuras del tipo bainita – ferrita acicular en una matriz ferrítica empleando aire a presión como medio de enfriamiento. Martensita – ferrita acicular en una matriz ferrítica poligonal cuando se empleó aceite como medio de enfriamiento. Usando rocío de agua como medio de enfriamiento se obtuvo martensita - bainita en forma de agujas y listones. Para la condición de enfriamiento usando agua – aceite se obtuvo una microestructura compuesta por una mezcla de martensita – bainita – ferrita acicular.
- La microdureza y tenacidad obtenida en los aceros tratados térmicamente en los distintos medios de enfriamiento, presentaron una buena combinación entre microdureza y tenacidad al impacto. La microdureza se incrementa en función de la velocidad de enfriamiento, siendo la condición con mayor microdureza usando como medio de enfriamiento el agua – aceite. La tenacidad disminuye con el incremento en la velocidad de enfriamiento, siendo esta misma condición la que presentó una menor tenacidad al impacto.
- El incremento en el tiempo de carga y en la presión aplicada de hidrógeno, tiende a reducir la microdureza y tenacidad en los aceros tratados térmicamente. Siendo, las condiciones más susceptibles las de enfriamiento en agua – aceite y la condición menos susceptible al efecto del hidrógeno se obtuvo en la condición con aire a presión.

#### **Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer al Ing. Iván Puente de la Facultad de Química-UNAM, al Ing. Hugo H. Galván Hinojosa del Instituto de Ciencias Físicas-UNAM por su apoyo técnico. Finalmente, al proyecto PAPIIT IN-115616 UNAM.

## REFERENCIAS

- [1] Campen, A., Mondal K. & Wiltowski T. (2008). Separation of hydrogen from syngas using a regenerative system. *Int. J. Hydrogen Energy*. 33(1), 332-339.
- [2] DeArdo, A. et al. (2009). On strength of microalloyed steels: an interpretive review. *Mater. Sci. Tech. Ser.* 25(9), 1074-1082.
- [3] Kang Y. et al. (2013). Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanism of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium. *Mater. Des.* 44, 331-339.
- [4] Luo H. et al. (2002). The influence of Ti on the hot ductility of Nb-bearing steels in simulated continuous casting process. *ISIJ Int.* 42(3), 273-282.
- [5] Koo, J. & Xie, C. (2006). Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel. *Mater. Des.* 27(10), 1169-1173.
- [6] Gangloff, R. & Somerday, B. (2012). *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. Elsevier.
- [7] San Marchi, C. et al. (2010). Fracture and fatigue of commercial Grade API Pipeline steels in gaseous Hydrogen. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*.
- [8] Fallahmohammadi, E., Bolzoni, F. & Lazzari, L. (2013). Measurement of lattice and apparent diffusion coefficient of hydrogen in X65 and F22 pipeline steels. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 2531-2543.
- [9] Domizzi, G., Anteri, G. & Ovejero, J. (2001). Influence of sulphur content and inclusion distribution on the hydrogen induced blister cracking in pressure vessel and pipeline steels. *Corros. Sci.* 43(2), 325-339.
- [10] ASTM E384 (1984). *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. Philadelphia.
- [11] ASTM E23 (1984). *Standard Metals for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Philadelphia.
- [12] Yuan, X. et al. (2006). The Onset Temperatures of  $\gamma$  to  $\alpha$ -Phase Transformation in Hot Deformed and Non-deformed Nb Micro-alloyed Steels. *ISIJ Int.* 46, 579-585.
- [13] Bockris, J. & Subramayan, P. (1971). The equivalent pressure of molecular hydrogen in cavities within metals in terms of the overpotential developed during the evolution of hydrogen. *Electrochim. Acta* 16, 2169-2179.
- [14] Shukla, R. et al. (2012). *An Ultra-low Carbon, Thermomechanically Controlled Processed Microalloyed Steel: Microstructure and Mechanical Properties*. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International.
- [15] Koo, J. et al. (2003). Metallurgical design of ultra-high strength steels for gas pipelines. In: *The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [16] Kim, J. et al. (2009). Microstructural influences on hydrogen delayed fracture of high strength steels. *Mater. Sci. Eng.* 505(1), 105-110.
- [17] Morito, S. et al. (2003). The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys. *Acta Mater.* 51(6), 1789-1799.

# Análisis de las propiedades mecánicas y metalográfica de las varillas de acero corrugadas comercializadas por las diferentes ferreterías bajo la norma ASTM (A706/706m, A615/A615m) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

José H. Arévalo R.<sup>1</sup>

Jhon Arévalo T.<sup>2</sup>

Universidad Francisco de Paula Santander  
Ocaña – Colombia

En la actualidad las construcciones diseñadas por los ingenieros necesitan garantizar las condiciones de los materiales y saber si cumplen con las normas establecidas para soportar los esfuerzos que en ellas ocurren, es por ello que esta investigación nos ayuda a conocer si los productos ofrecidos por las ferreterías ubicadas en la ciudad de Ocaña cumplen con las condiciones para las estructuras de hormigón, luego de caracterizar las varillas determinando su dureza, análisis metalográfico y sus esfuerzos a tracción, se verifico si los resultados cumplen con las condiciones mínimas de la norma y si estos valores corresponden con los datos dados por los fabricantes, al realizar los análisis podemos constatar que las propiedades mecánicas de las varillas cumplen con la norma y con las especificaciones dadas por la empresa que las fabrica, en algunos casos dichos valores se encuentran por encima de la norma.

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que el municipio de Ocaña Norte de Santander ha tenido una gran evolución en la parte de infraestructura desde que comenzaron adoptar las construcciones de los españoles, que comenzaron con palos o cañas entretrejidas y barro, por lo cual en la actualidad se han mejorado estos tipos de construcciones ya que se han remplazado el barro por el hormigón y palo o las cañas por las varillas de aceros corrugadas mejorando así la resistencia a los esfuerzo de compresión, flexión, tracción, cortante, etc. El motivo de esta investigación es realizar un análisis de las varillas de acero corrugadas más utilizadas en las diferentes construcciones como material estructural en el municipio de Ocaña Norte de Santander, incluyendo la verificación y ejecución de los requerimientos técnicos en el cumplimiento de las propiedades mecánicas y metalográficas de las varillas de acero corrugadas.

El objetivo de esta investigación está enfocado a presentar la aplicabilidad de la gestión de conocimiento soportada en TIC, como soporte a la implementación de BPGF en IES y como una base para la propuesta de modelos y marcos de trabajos donde se promuevan, tomando como referente a la gestión de conocimiento y su implementación a través de las TIC. Por consiguiente, se presentará un acercamiento a los conceptos de gestión de conocimiento, BPGF basadas en conocimiento en las IES y TIC que apoyan estos temas. Esto es el resultado de la búsqueda de información en las bases de datos ISI Web of Knowledge y Scopus, así como en diferentes sitios de internet y otras publicaciones, asociados a mejores prácticas en la gestión financiera en las IES.

El objetivo de esta investigación fue determinar las propiedades mecánicas y metalográfica de las varillas de acero corrugadas comercializadas por las diferentes ferreterías bajo la norma ASTM (A706/706M, A615/A615M) [1] en el municipio de Ocaña Norte de Santander, Por lo tanto este estudio permitió hacer una comparación de las propiedades mecánicas y metalográficas de las varillas de acero corrugadas con las especificaciones técnicas nacionales ofrecidas por los proveedores quienes son los encargados de distribuir los diferentes materiales que se utilizan en las construcciones en el municipio de Ocaña Norte de Santander.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 La norma ASTM

ASTM o ASTM International es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica, acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Existen alrededor de 12,575 acuerdos voluntarios de normas de aplicación mundial. Las oficinas principales de la organización ASTM internacional están ubicadas en West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos de América, como a 8 kilómetros (5 millas) al noroeste de la ciudad de Filadelfia. ASTM International es uno de los editores técnicos de normas, artículos y documentos técnicos e información relacionada más reconocido del mundo. Con más de 13,000 normas, más de 1,500 libros, y más de 60,000 artículos y capítulos, la Biblioteca Digital de Ingeniería y Normas de ASTM (SEDL, por sus siglas en inglés) es la forma más rápida y cómoda para tener acceso a más de 100 años de investigación y competencia tecnológica recopilada por la comunidad mundial de expertos de ASTM [2].

### 2.2 El acero corrugado o varilla corrugada

Es una clase de acero laminado diseñado especialmente para construir elementos estructurales de hormigón armado. Se trata de barras de acero que presentan resaltes o corrugas que mejoran la adherencia con el hormigón, y poseen

---

<sup>1</sup> [jharevalor@ufpso.edu.co](mailto:jharevalor@ufpso.edu.co)

<sup>2</sup> [jarevalot@ufpso.edu.co](mailto:jarevalot@ufpso.edu.co)

una gran ductilidad, la cual permite que las barras se puedan cortar y doblar con mayor facilidad. Se llama armadura a un conjunto de barras de acero corrugado que forman un conjunto funcionalmente homogéneo, es decir, que trabajan conjuntamente para resistir cierto tipo de esfuerzo en combinación con el hormigón. Las armaduras también pueden cumplir una función de montaje o constructiva, y también se utilizan para evitar la fisuración del hormigón [3].

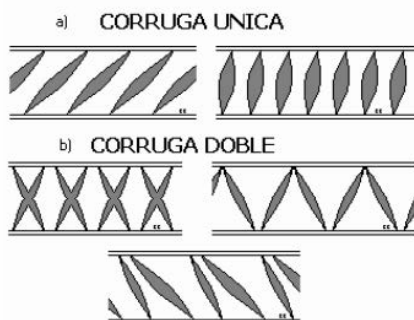
### 2.3 Tipos de varillas de aceros

La norma establece que el tipo de varillas por el esfuerzo de fluencia mínima, designada por el grado La varilla suele ser fabricada en los grados 40, 60 y 75 alrededor del mundo, sin embargo, en Colombia el grado comercial que se produce es el 60. Respecto a la composición química por la norma ASTM A751 donde se debe determinar los porcentajes de carbono, manganeso, azufre, silicio, cobre, níquel, cromo, molibdeno, niobio y vanadio. En la Tabla 36 se muestran los valores que deben limitarse para la composición química de la colada.

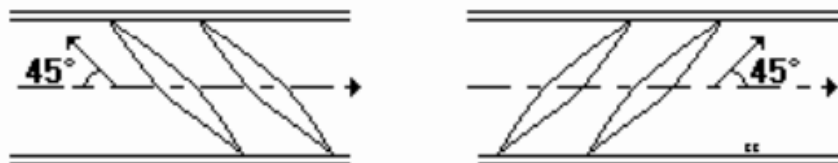
**Tabla 36.** Composición química de la colada [4]

COMPOSICION QUIMICA DE LA COLADA	
ELEMENTO	% MINIMO
carbono	0,30
manganeso	1,50
fosforo	0,035
azufre	0,045
silicio	0,50

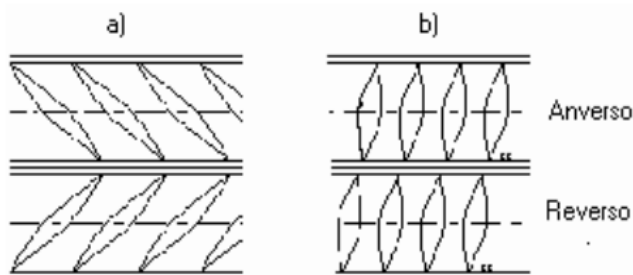
La norma también establece la masa nominal en kg/m y las dimensiones nominales en diámetro, área de la sección transversal y perímetro de las varillas comercialmente disponibles. Las corrugaciones deben estar espaciadas a lo largo de la barra a distancias sustancialmente uniformes. Las corrugaciones sobre lados opuestos de la barra deben ser similares en tamaño, forma y patrón. En las Figura 72, 2 y 3 se muestra el diagrama según el tipo de varilla corrugada, el ángulo de la corrugación y la dirección de la corrugación, esto con el fin de mostrar cómo deben estar ubicada la corrugación con respecto al eje longitudinal de la barra, en forma tal, que el ángulo incluido no sea menor a 45°. Donde la línea de corrugaciones forma un ángulo incluido con el eje de la barra de 45° a 70° inclusive, las corrugaciones deben revertirse en su dirección alternativamente sobre cada lado, o aquellas sobre un lado, deben revertirse en dirección de aquellas del lado opuesto.



**Figura 72.** Diagrama de tipo de corrugada (a) y (b) [4]



**Figura 73.** Angulo de la corrugación [4]



**Figura 74.** Dirección de corrugas de acuerdo al ángulo a)  $45^\circ \leq A \leq 70^\circ$ ; b)  $70^\circ \leq A \leq 90^\circ$  [4]

Cada varilla debe estar marcada por el fabricante según la norma, en la Figura 75 se muestra la simbología utilizada y la forma de marcado según la Norma NTC 2289, esto con el fin de identificar el tipo de varilla y sus dimensiones.

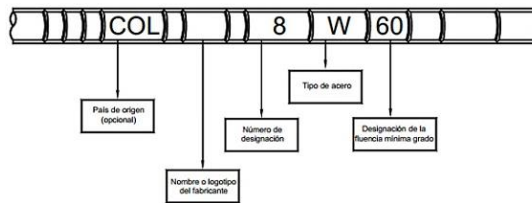


Figura B.1. Ejemplo para el marcado de barras en sistema inglés

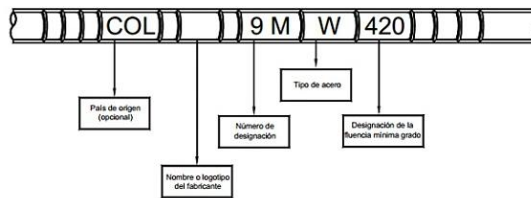


Figura 75. Marcado de varillas de aceros corrugados en sistema inglés y métrico [4]

### 3. MÉTODO Y RESULTADOS

Para la realización de este proyecto, se efectuó una investigación descriptiva. Con el fin de analizar de las propiedades mecánicas y metalográficas de las varillas de acero corrugadas por medio de ensayos en los laboratorios de la Universidad Francisco de Paula Santander aplicando la norma ASTM (A706/A706M). La población para esta investigación correspondió a 5000 varillas de acero corrugadas distribuidas por 5 ferreterías mayoristas ubicadas en el municipio de Ocaña Norte de Santander.

#### 3.1 Análisis de oferta de varillas corrugadas en el municipio de Ocaña

- *Numero de ferreterías distribuidoras de varillas corrugadas en el municipio de Ocaña.* Mediante la realización de encuestas se determinó que el número de ferreterías proveedores de varillas corrugadas en el municipio de Ocaña son 42.
- *Diámetros de uso común en el municipio de Ocaña.* Gracias a la encuesta realiza se encontró que los diámetros de uso común son las de media pulgada como se muestra en la Figura 76, ya que las edificaciones en el municipio no son de gran envergadura.

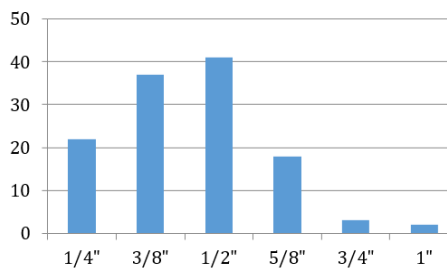


Figura 76. Diámetros de uso común

- *Muestreo de las varillas de aceros corrugadas en las ferreterías seleccionadas.* Se determinó mediante muestreo que en el municipio de Ocaña se encuentran 14 proveedores que distribuyen en las diferentes ferreterías las varillas de acero corrugado teniendo en cuenta cuatro fabricantes (Ferrasa, Diaco, Paz del Rio y transfor) que producen sus propias varillas, a diferencia a las otras que sólo son distribuidores, como se muestra en la Figura 77.

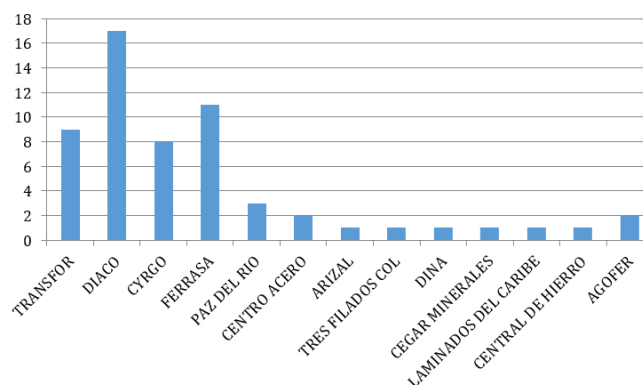


Figura 77. Fábricas de varillas corrugadas



### 3.2 Análisis de las propiedades metalográficas, mecánicas y estructurales, a través de ensayos de laboratorio

- Características de dureza.** Con la ayuda del laboratorio de materiales metálicos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña se realizó la prueba de dureza Rockwell B en el durómetro digital Mitutoyo que tiene una capacidad de 150 KgF. El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E18 y A370, el ensayo se realizó con las siguientes condiciones una fuerza de 100k KgF con una penetración de bola de 1/16, de esta manera se tiene en cuenta las dimensiones de la muestra se tomarán los diferentes puntos de referencia sobre a superficies. Mediante la norma ASTM E18, se deben tomar diferentes puntos de referencias de dureza a lo largo de la superficie, por lo cual se promedia para estandarizar la dureza que presenta el material, debido a que el material es blando se estableció con la prueba de dureza Rockwell B, como se puede observar en la Tabla 37.

Tabla 37. Selección de prueba Rockwel

Método	Escala	Fuerza de prueba				Penetrador		Local Indicado
		Fuerza de prueba		Símbolo de fuerza		Penetrador (mm)	Símbolo Penetrador (*3)	
		Precarga	Carga	Precarga (*1)	Carga (*2)			
Rockwell Normal	A		588,4		60	Diamante	Dia	(*3) Painel Delantero
	D		980,7		100			
	C		1471		150			
	F		588,4		60			
	B		980,7		100			
	G		1471		150			
	H		588,4		60	Bola 1,5875	1/16	
	E	98,07	980,7	R (NOTA 2) 10 KgF	100			
	K		1471		150			
	L		588,4		60			
	M		980,7		100			
	P		1471		150			
	R		588,4		60			
	S		980,7		100			
	V		1471		150	Bola 3,175	1/8	
						Bola 6,35	1/4	(*2) Pesos (HR-110/210)
					Bola 12,7	1/2		

Tabla 38. Promedio de dureza por muestras de cada empresa

promedio de dureza por muestra				
Fabricante	Rockwell B (HRB)	Vicker (HV)	Brinell (HB)	
	89,61	183,05	183,05	
	90,57	187,85	187,85	
	84,19	162,50	162,50	
	87,35	173,40	173,40	

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 38 se dice que el fabricante Transfor fabrica las varillas de acero corrugado con mayor dureza con respecto a las demás fábricas (Ferrasa, Paz del Rio, Diaco). Por la cual también se deduce que Diaco produce las varillas de acero corrugado con menos dureza con respecto a las otras fábricas como se puede observar en la tabla anterior (promedio de dureza por muestra).

### 3.3 Análisis metalográfico

Las muestras para el análisis metalográfico se extrajeron de las varillas corrugadas como se observa desde la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** hasta la Figura 81, para cada análisis se utilizó la norma ASTM A247 [5], La cual especifica el procedimiento adecuado y así poder observar la microestructura del material.

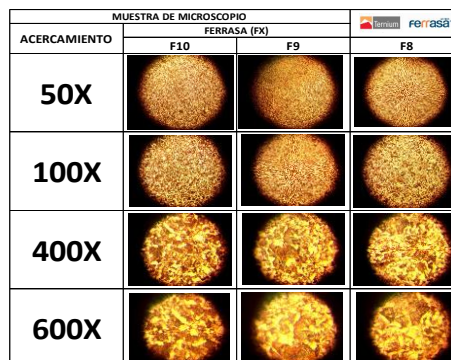


Figura 78. Resultados obtenidos en el microscopio Ferrasa

MUESTRA DE MICROSCOPIO			GERDAU DIACO
ACERCAMIENTO	DIACO (D)		
		D10	D9
50X			
100X			
400X			
600X			

Figura 79. Resultados obtenidos en el microscopio Diaco

MUESTRA DE MICROSCOPIO			SICARTSA
ACERCAMIENTO	TRANSFOR (T)		
		T10	T9
50X			
100X			
400X			
600X			

Figura 80. Resultados obtenidos en el microscopio Transfor

MUESTRA DE MICROSCOPIO			Paç del Rio
ACERCAMIENTO	PAZ DEL RIO (P)		
		P10	P9
50X			
100X			
400X			
600X			

Figura 81. Resultados obtenidos en el microscopio Paz del Rio

Al observar los resultados del análisis de la micro estructura metalográfica, se encuentra en las imágenes de cada una de las micro estructuras de los proveedores, que el material con el cual se fabrican las varillas es acero de bajo carbono. Lo que corresponde a un acero hipoeutectoide que tiene un contenido de carbono inferior al 0,77%, lo que se puede observar en las imágenes donde se detallan las fases presentes como lo son la ferrita en los granos claros, la fase eutectoide denominado perlita en las zonas oscuras de las imágenes. Lo que da como resultado del estudio un acero de bajo carbono para la fabricación de las varillas de acero corrugado que son comercializadas en el municipio de Ocaña Norte de Santander.

### 3.4 Análisis de resistencia a la tensión

Para determinar la resistencia a la tracción de cada uno de los fabricantes, se escogieron 5 muestras que fueron sometidas a cargas que llevaran el material hasta la ruptura para conocer las propiedades mecánicas de cada uno de los fabricantes para luego compararlas con las especificaciones de catálogo que suministra cada uno de ellos. Para realizar estas pruebas se tomaron sub-muestras de 500mm de cada fabricante y proveedor de una muestra inicial de 1000 mm, a las cuales se les realizaron medición de las características físicas para luego realizar las pruebas de tensión[6]. Desde la Figura 82 hasta la Figura 85 se puede observar el comportamiento de las varillas cuando son sometidas a tensión, esto con el fin de verificar si sus esfuerzos corresponden a los especificados por el fabricante.

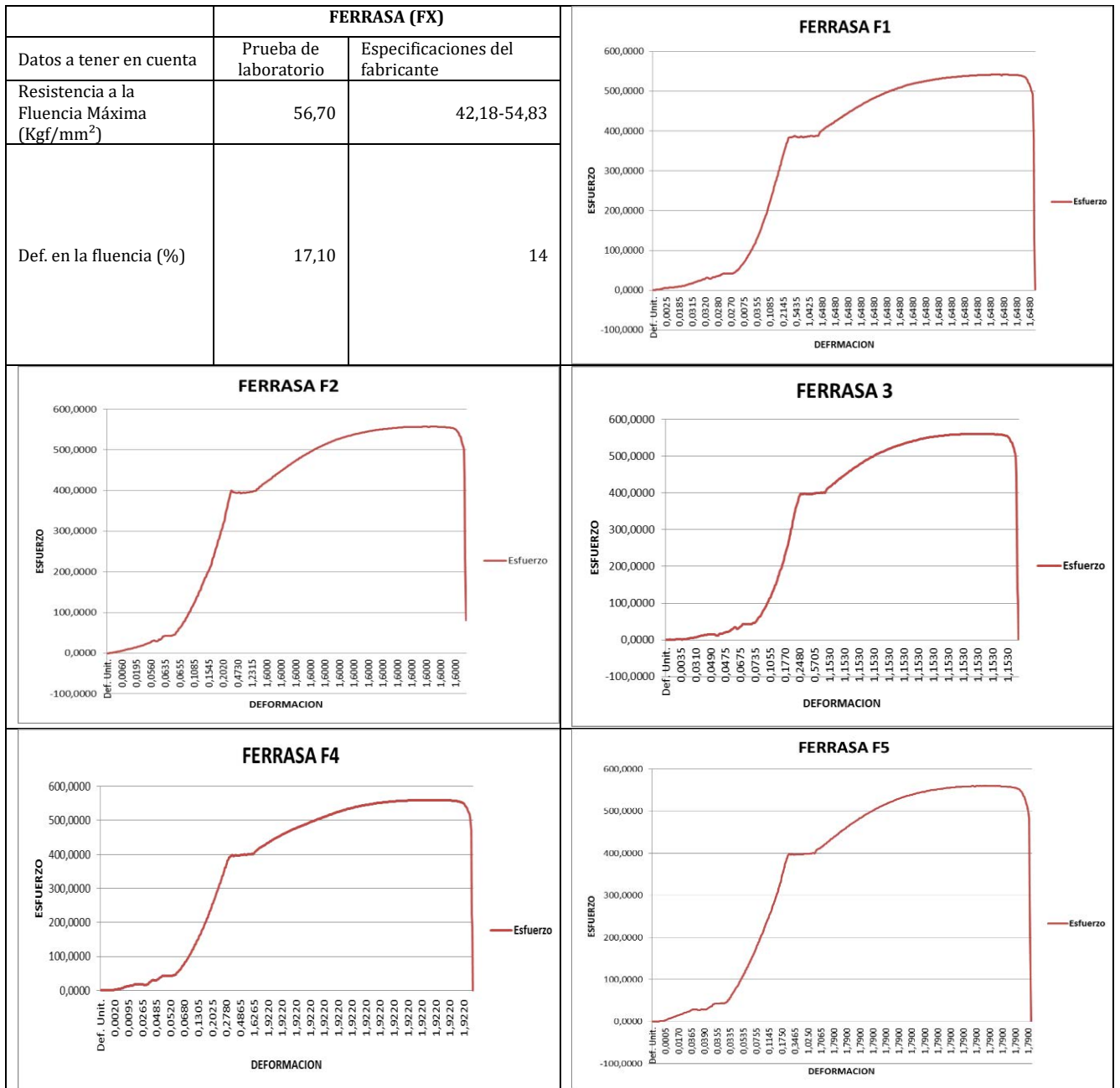
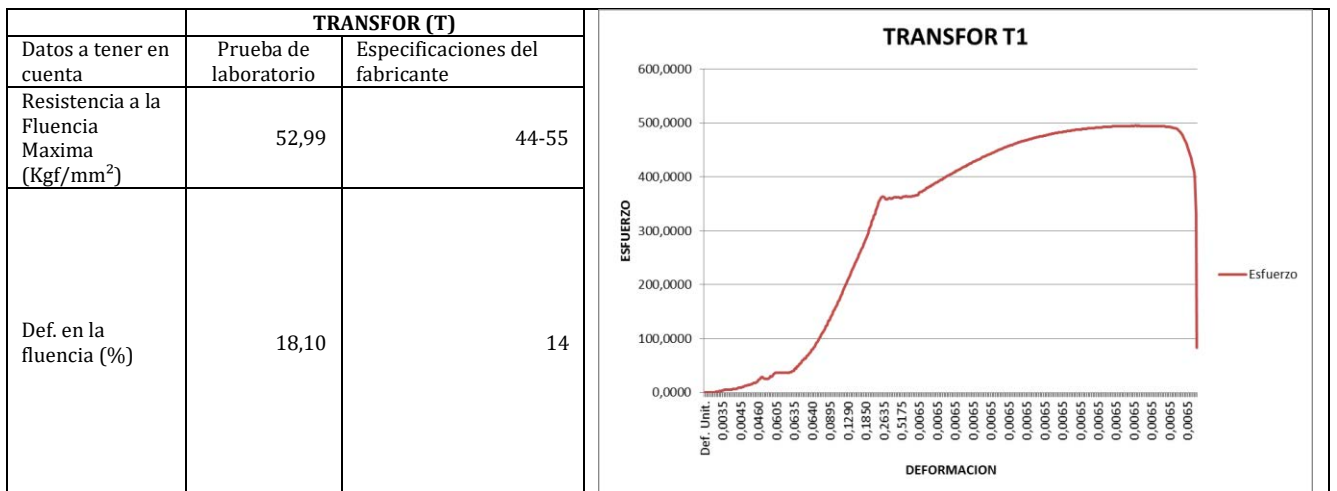


Figura 82. Análisis comparativo de las especificaciones mínimas de la resistencia a la fluencia y el % de la deformación de fluencia (200 mm) de Ferrasa



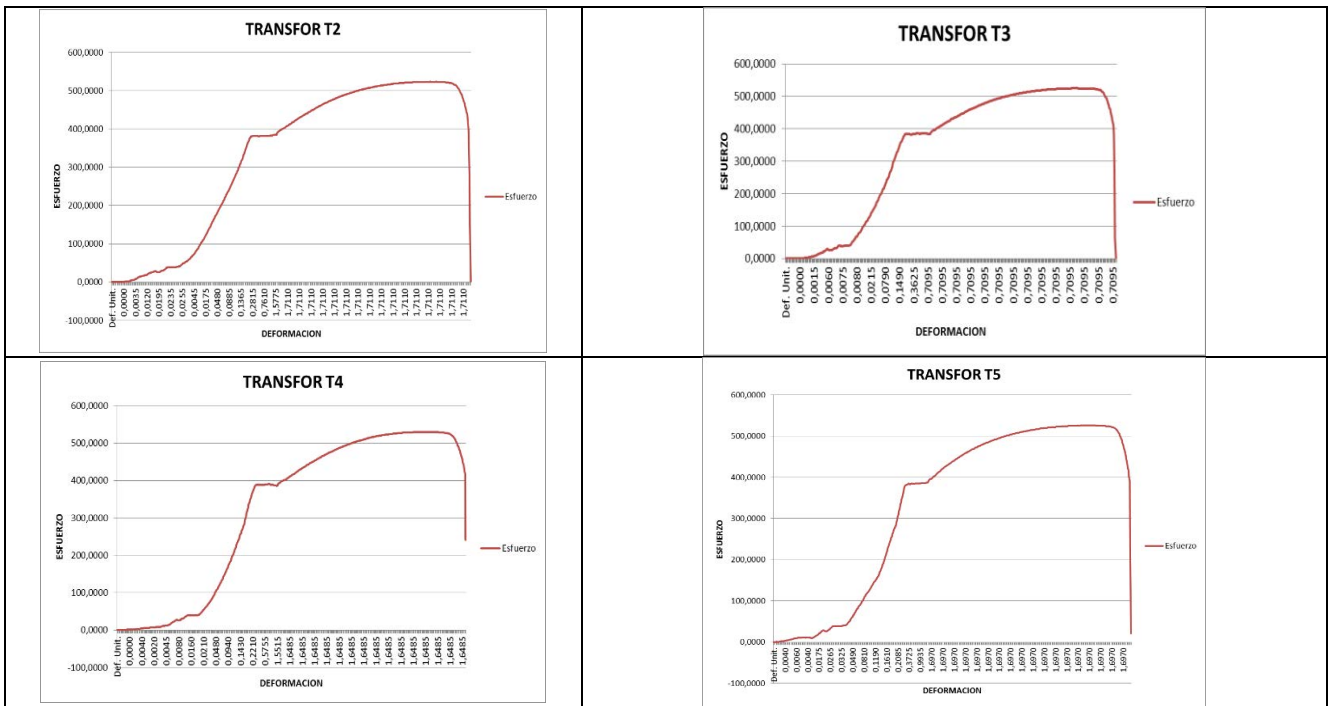


Figura 83. Análisis comparativo de las especificaciones mínimas de la resistencia a la fluencia y el % de la deformación de fluencia (200 mm) de Transfor

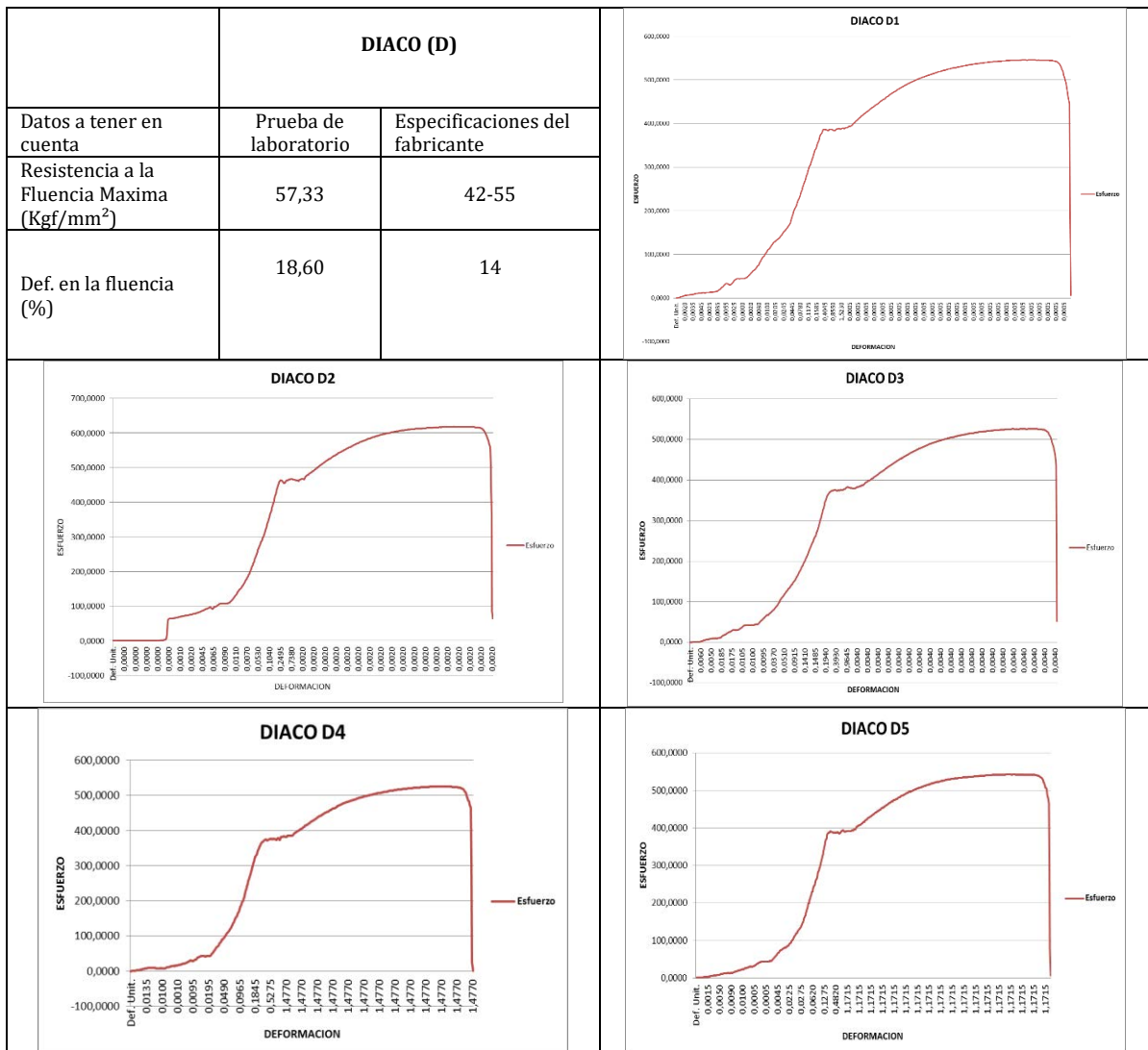
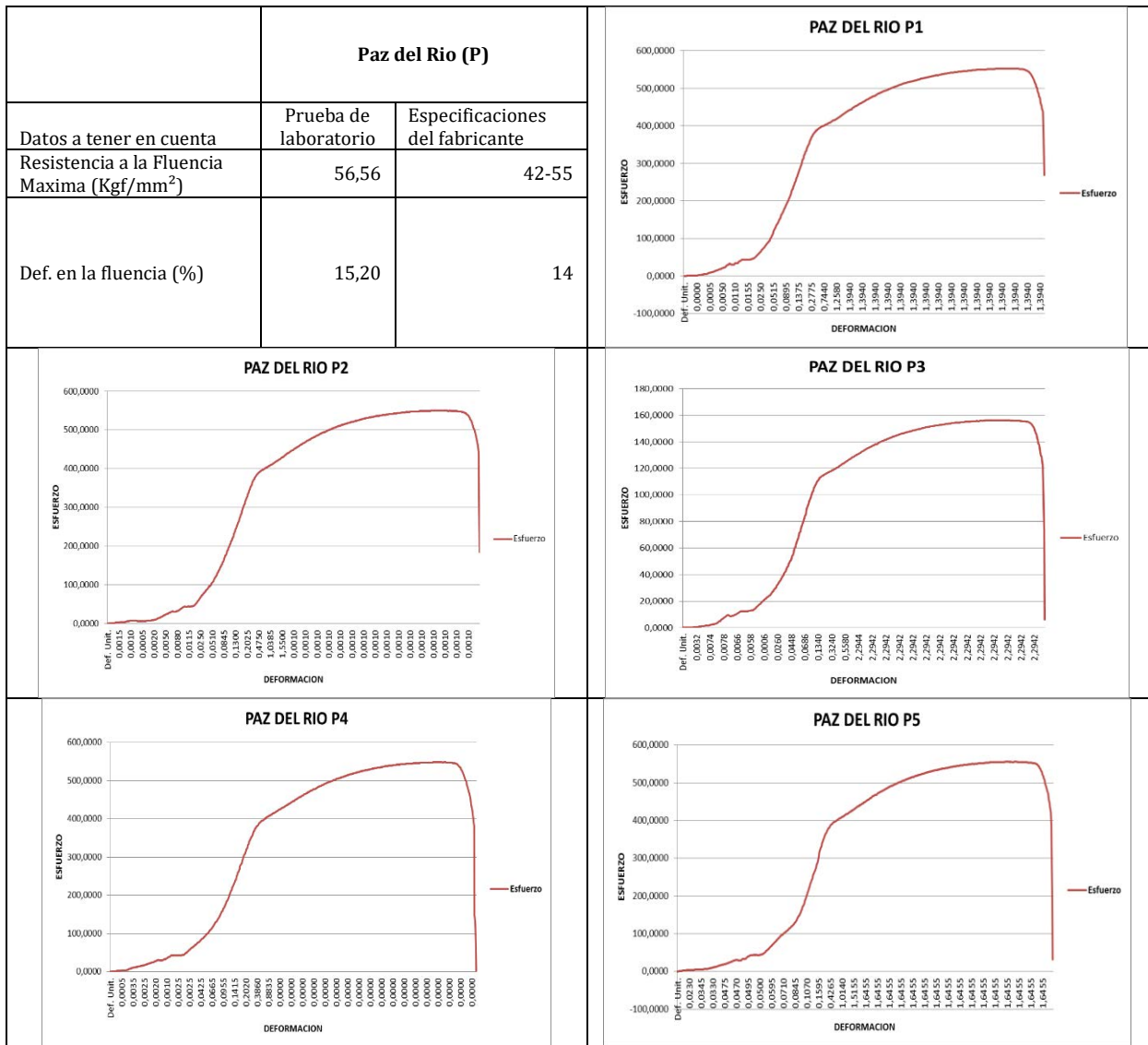


Figura 84. Análisis comparativo de las especificaciones mínimas de la resistencia a la fluencia y el % de la deformación de fluencia (200 mm) de Diaco



**Figura 85.** Análisis comparativo de las especificaciones mínimas de la resistencia a la fluencia y el % de la deformación de fluencia (200 mm) de Paz del Rio

Se pudo observar en cada una de las figuras anteriores el comportamiento de las varillas cuando son sometidas a un esfuerzo de tensión, esto se realizó para cada una de las varillas según su fábricas, este análisis se obtuvo en los laboratorio de la Universidad Fráncico de Paula Santander Ocaña y se pudo comprobar que las varillas analizadas cumplen con las propiedades mecánica (resistencia a la fluencia máxima y deformación en la fluencia) propuestos en los catalogo del fabricante ya que se mantiene en los rango que muestra cada uno de ellos aunque en algunos este por encima del rango, por lo tanto cumple con las normas estipuladas para ser comercializadas [7].

#### 4. CONCLUSIONES

Con la ayuda del laboratorio de Resistencia de materiales y Metalografía de la Universidad francisco de Paula Santander, se determinaron las propiedades mecánicas de las probetas de cada una de las fábricas que distribuyen las varillas de acero corrugado teniendo en cuenta la resistencia a la fluencia máxima (Kgf/mm<sup>2</sup>) y deformación en la fluencia (%) en el ensayo de tensión con la cual ayudó a comprobar que las varillas cumplen con los estándar requeridos por la norma y con los parámetros establecidos en los catálogos de cada fabrica. Teniendo en cuenta que Ferrasa, Paz del Rio y Diaco están un poco por encima de lo ofrecido por sus catálogos.

Un aspecto importante que complemento esta investigación fue el ensayo de dureza Rockwell B que se realizó en el laboratorio de metalografía de la Universidad francisco de Paula Santander Ocaña, con el Durómetro digital Mitutoyo en cada probeta de los diferentes fabricantes en la cual Transfor tiene mayor dureza con respecto a los demás fabricantes que distribuyen en el municipio de Ocaña, pero manteniéndose con valores muy cercanas a esta. En la que también se observó que al momento de hacer las pruebas en cinco puntos (centro y esquinas) se apreció que en el centro tiene mayor dureza ya que tiene un enfriamiento al aire libre que va desde la parte externa de la varilla hasta la interna de manera muy lenta la cual hace que tenga mejores propiedades en el centro de la varilla.

## REFERENCIAS

- [1] American Society for Testing and Materials (2001). ASTM A 706/A 706M-01. Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement.
- [2] Digital, B. & Astm, N. (1932). Ingeniería y Normas ASTM Acceso a solicitud a cada norma , Biblioteca Digital de Ingeniería y Normas ASTM Ingeniería y Normas ASTM.
- [3] Muñoz, A., Delgado, R. & Peña, C. (2011). [Desempeño sísmoresistente de edificios de muros de ductilidad limitada](#). Online [Jan 2018].
- [4] Icontec (2007). Norma NTC 2289 no. 571.
- [5] ASTM A247 (1998). Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. a247 67, 3-4.
- [6] Ortiz, L. (2007). Resistencia de materiales. McGraw Hill.
- [7] Pytel, A. & Singer, F. (1994). Resistencia de Materiales. Alfa Omega.

En este capítulo se analiza la I+D+i en Colombia, partiendo de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT, 2005 - 2014. Las variables analizadas incluyen: número de empresas por grado de innovación, montos y fuentes de la innovación, doctores, patentes y apropiación científica. Se registró una disminución de empresas innovadoras en sentido estricto, y un aumento de empresas no innovadoras. La mayoría de los rubros para innovación son aportados por las empresas, los doctores vinculados a la industria no superan el 0,5%. Es necesario establecer instrumentos de seguimiento a las políticas para mejorar la innovación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La innovación constituye el insumo fundamental para el desarrollo de las economías, de hecho, los resultados de la aplicación de la innovación: la inversión de empresas en actividades de investigación y desarrollo, la vinculación con universidades para la generación de desarrollos tecnológicos alineados con las vocaciones productivas regionales, la introducción de nuevos productos y servicios en el mercado, la consolidación de alianzas estratégicas y el aumento de los niveles de asociatividad en los sectores empresariales, aparecen como constantes en todos los países con altos niveles de desarrollo a nivel mundial. Bajo esta perspectiva, la implementación de innovaciones en el sector productivo se traduce en la consolidación de un sector dinámico, congruente con las necesidades y las potenciales del entorno nacional e internacional, y vinculado activamente con la academia para garantizar la apropiación del conocimiento científico en los sectores productivos; dinámica que corresponde a un ejercicio fundamental para lograr desarrollo económico sustentable en la región, debido a que constituyen necesidades preponderantes y debilidades estructurales para el sector empresarial de la región.

Pese al escenario anteriormente descrito, se presentan falencias en la aplicación del concepto en el contexto de la estructura empresarial de Colombia, constituida fundamentalmente por micro, pequeñas y medianas empresas, por lo que resulta determinante establecer mecanismos que promuevan la dinámica de innovación, con el objeto de dinamizar y fortalecer la competitividad y la productividad, lo que se traduciría en desarrollo socioeconómico. En síntesis, un sector empresarial innovador constituye la base para consolidar una economía competitiva, con altos estándares de calidad, capaz de enfrentar las necesidades del mercado, y, en consecuencia, generadora de calidad de vida para sus habitantes.

El presente documento se analiza la dinámica de la innovación empresarial en Colombia a partir de las encuestas de innovación de las empresas realizada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, y los marcos normativos en Ciencia, Tecnología e Innovación. Específicamente, se analizan las perspectivas teóricas de la innovación, el escenario de la innovación empresarial en el país, el análisis de la relación I+D+i desde la perspectiva compleja, así como las propuestas de mejoramiento y las conclusiones.

## 2. PERSPECTIVAS TEÓRICAS

Schumpeter [1] quien fue el primero en destacar la importancia de los fenómenos tecnológicos en el crecimiento económico, definió la innovación, en un sentido más general, que el de las específicamente tecnológicas, abarcando los siguientes casos: la introducción en el mercado de un nuevo bien; la introducción de un nuevo método de producción o comercialización de productos, fundamentada en un descubrimiento científico; la apertura de un nuevo mercado en el país; la conquista de una nueva fuente de suministro de materias primas o de productos semielaborados; y, la implantación de una nueva estructura en un mercado.

Según el Manual de Oslo de [2], innovación es “la implementación de un producto (bien o servicio), o proceso, nuevo o significativamente mejorado, un nuevo método de comercialización, o un nuevo método organizacional en las prácticas de negocio, la organización del lugar de trabajo o las relaciones externas” p.56. De acuerdo con el Manual de Bogotá, el concepto de innovación es más amplio que el definido en el Manual de Oslo, la definición de las actividades de innovación del Manual de Bogotá, incluye no sólo las que el Manual de Oslo establece como tales, es decir, actividades de innovación para lograr un cambio tecnológico y creativo; sino además el conjunto de actividades constitutivas del “esfuerzo tecnológico” [3].

A su vez, [1] quien fue el primero en destacar la importancia de los fenómenos tecnológicos en el crecimiento económico, definió la innovación, en un sentido más general, que el de las específicamente tecnológicas, abarcando los siguientes casos: la introducción en el mercado de un nuevo bien; la introducción de un nuevo método de

---

<sup>1</sup> [van.pertuz@mail.udes.edu.co](mailto:van.pertuz@mail.udes.edu.co)

<sup>2</sup> [adithperez@unicesar.edu.co](mailto:adithperez@unicesar.edu.co)

producción o comercialización de productos, fundamentada en un descubrimiento científico; la apertura de un nuevo mercado en el país; la conquista de una nueva fuente de suministro de materias primas o de productos semielaborados; y, la implantación de una nueva estructura en un mercado.

De otro lado, producto de la revisión de la literatura es relevante indicar que la innovación es de vital importancia para el crecimiento y la competitividad de empresas y países, concepto que fue creciendo a partir de los años 1950 y se incrementó en la década de 1980 [4]. De este modo, durante mucho tiempo la innovación ha estado asociada al crecimiento de la productividad [5-7]. Específicamente en la investigación de [8] se comprobó que la inversión en innovación, impulsa el crecimiento a largo plazo y no a la inversa. Por otra parte, las actividades innovadoras, en especial la inversión en Investigación y desarrollo (I+D), han sido tradicionalmente consideradas, clave para el desarrollo de las nuevas competencias y habilidades necesarias para explorar, adquirir y adaptar la tecnología existente [9-11].

### **3. ESCENARIO DE INNOVACIÓN EMPRESARIAL EN COLOMBIA**

La evidencia empírica y los hallazgos de las investigaciones referentes a la innovación, señalan la importancia de la misma como un insumo fundamental para lograr la productividad y la competitividad a nivel nacional y en el contexto empresarial. Según lo planteado en el Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia, el marco legal para el apoyo a la ciencia y la tecnología en Colombia inicia en 1968, y se consolida con la Ley 29 de 1990 y los Decretos Ley 393, 585 y 591 de 1991. Asimismo, en 1991, la Constitución del país en el artículo 70 estableció “que el Estado tiene el deber de promover y fomentar el acceso a la cultura de todos los colombianos en igualdad de oportunidades, por medio de la educación permanente y la enseñanza científica, técnica, artística y profesional”. Recientemente, la ley 1286 de 2009, que transforma a Colciencias en Departamento Administrativo y se fortalece el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación en Colombia [12].

En consecuencia, desde el contexto empresarial y de las diferentes políticas públicas se ha promovido la aplicación de la innovación, específicamente, ley 1286 de 2009 [13], la cual regula la actividad científica y tecnológica del país, plantea como objetivo general: “fortalecer el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología y a Colciencias para lograr un modelo productivo sustentado en la ciencia, la tecnología y la innovación, para darle valor agregado a los productos y servicios de nuestra economía y propiciar el desarrollo productivo y una nueva industria nacional”.

Recientemente, la Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, planteada por el [14] define la visión a largo plazo de la CTI de Colombia, identificando como problema principal el hecho de que “que el país y sus regiones no han logrado impulsar el desarrollo económico y social a través de la ciencia, tecnología e innovación” p.3. En este mismo sentido, el estado ha impulsado diversos marcos normativos para el desarrollo de innovación tales como el documento CONPES 3834 el cual plantea los lineamientos de política para estimular la inversión privada en ciencia, tecnología e innovación a través de deducciones tributarias [15].

Asimismo, el CONPES 3835, mediante el cual se efectúa la “declaración de importancia estratégica del proyecto de apoyo a la formación del capital humano altamente calificado en el exterior”. Esta política fue formulada conjuntamente por la Unidad de Diseño y Evaluación de Políticas Públicas y el Consejo Nacional de Política Económica y Social [14, 16]. Lo anterior, como un mecanismo para aumentar la inversión privada en procesos de ciencia, tecnología e innovación, y aumentar la dinámica del país en este sentido.

Dada la importancia de la evaluación de políticas públicas como un mecanismo para garantizar el cumplimiento de los objetivos, en materia de Ciencia, Tecnología e Innovación, se creó en el mes de septiembre de 2015, la Unidad de Diseño y Evaluación de Políticas Públicas (UDEP), liderada por el Departamento Administrativo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, con el objeto de “aunar esfuerzos institucionales para promover proyectos, estudios y actividades orientados a fortalecer estos procesos de diseño y evaluación de políticas públicas de Colciencias” [17]. La Unidad en referencia esta direccionada a mejorar las políticas públicas de Ciencia, Tecnología e Innovación del país, con el fin de lograr la meta planteada por Colciencias de consolidar una nación Científica y en uno de los países más innovadores [17].

En contraste, analizando los indicadores internacionales de competitividad e innovación en Colombia y el mundo, el Índice Global de Competitividad (IGC) 2014-2015, publicado por el [18] revela que Colombia pasó de 4,19 a 4,23, ubicándose en la posición 66 entre 144 economías, y séptima en América Latina. El IGC incluye tres subíndices: requerimientos básicos, factores que mejoran la eficiencia, y factores de innovación y sofisticación. En referencia a este último, sofisticación de negocios ganó una posición en la medición, mientras que en innovación descendió cuatro casillas [18].

A nivel nacional, la innovación presenta deficiencias cada vez más sustanciales en su implementación en el contexto empresarial, pese a que la dinámica de negocios en la que interactúan las empresas, demanda el desarrollo de altos niveles de competitividad y calidad, el planteamiento anterior se sustenta en el análisis efectuado en la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT, la cual clasifica las empresas en cuatro categorías de innovación descritas de la siguiente manera: innovadoras en sentido estricto, innovadoras en sentido amplio, potencialmente innovadoras y no innovadoras [19]. La Tabla 1 presenta los resultados por categorías de las encuestas EDIT en diferentes periodos.

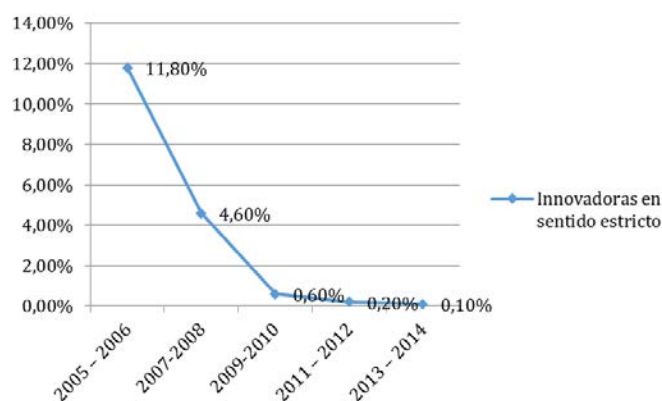


**Tabla 1.** Análisis de la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica EDIT-industria manufacturera

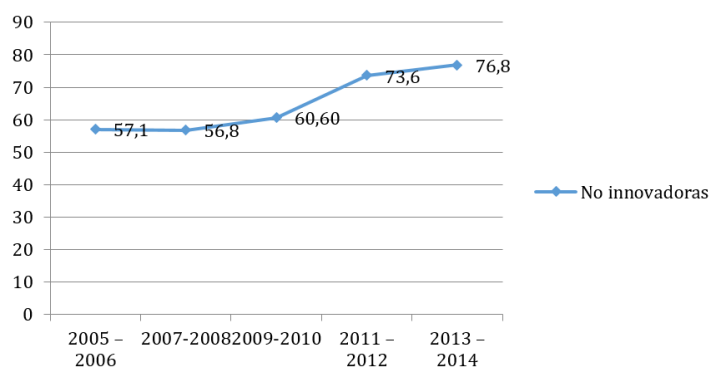
Periodo / Categorías	2005 - 2006		2007-2008		2009-2010		2011 - 2012		2013 - 2014	
	Empresas	%	Empresas	%	Empresas	%	Empresas	%	Empresas	%
Innovadoras en sentido estricto	717	11,8	354	4,6	52	0,60	18	0,2	9	0,1
Innovadoras en sentido amplio	1332	21,9	2553	33,2	2918	33,80	1964	21,5	1705	19,3
Potencialmente innovadoras	559	9,2	408	5,3	440	5,10	429	4,7	336	3,8
No innovadoras	3472	57,1	4368	56,8	5232	60,60	6725	73,6	6785	76,8
Total	6.080	100	7.683	100	8.643	100	9.137	100	8.835	100

Fuente: Elaboración propia (2016) a partir de información histórica del DANE [19]

Es relevante destacar de la información de la Tabla 1, la tendencia de las empresas innovadoras en sentido y las empresas no innovadoras. Al respecto, se evidencia una tendencia decreciente en este tipo de empresas, de acuerdo con los resultados de las diferentes encuestas de innovación (EDIT) desde el año 2005 hasta el año 2014. En el periodo 2005 - 2006, el porcentaje de empresas innovadoras en sentido estricto es 11,8%, mientras que en el año 2013 - 2014, el porcentaje corresponde a 0,10% (Figura 1).

**Figura 1.** Tendencia de empresas innovadoras en sentido estricto, 2005 - 2014 (A partir dr [19])

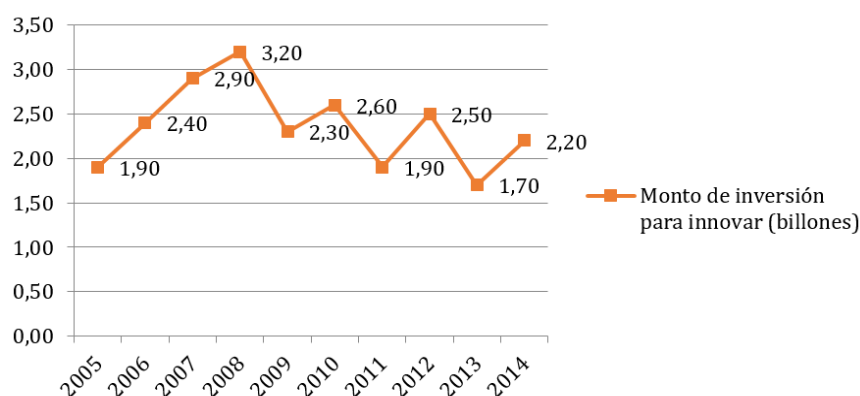
En contraste, el porcentaje de empresas no innovadoras de acuerdo a esta encuesta es ha aumentado en el periodo en referencia, en el año 2005 - 2006, este porcentaje corresponde a 57,1%, mientras que en el periodo 2013 - 2014, este porcentaje se ubica en 76,8% (Figura 2).

**Figura 2.** Tendencia de empresas no innovadoras, periodo 2005 - 2014 (A partir de [19])

Otra de las variables consideradas en el análisis de la dinámica de innovación empresarial es el monto de inversión para innovar. La Tabla 2 y la Figura 3 describen el monto de inversión para innovar de acuerdo con los resultados de la encuesta EDIT publicada por Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE [19].

**Tabla 2.** Monto de inversión para innovar en billones de pesos, periodo 2005 - 2014 (A partir de [19])

Año	Monto de inversión para innovar
2005	\$1,9 billones
2006	\$2,4 billones
2007	\$2,9 billones
2008	\$3,2 billones
2009	\$2,3 billones
2010	\$2,6 billones
2011	\$1,9 billones
2012	\$2,5 billones
2013	\$1,7 billones
2014	\$2,2 billones



**Figura 3.** Monto de inversión para innovar en billones de pesos, periodo 2005 – 2014 (A partir de [19])

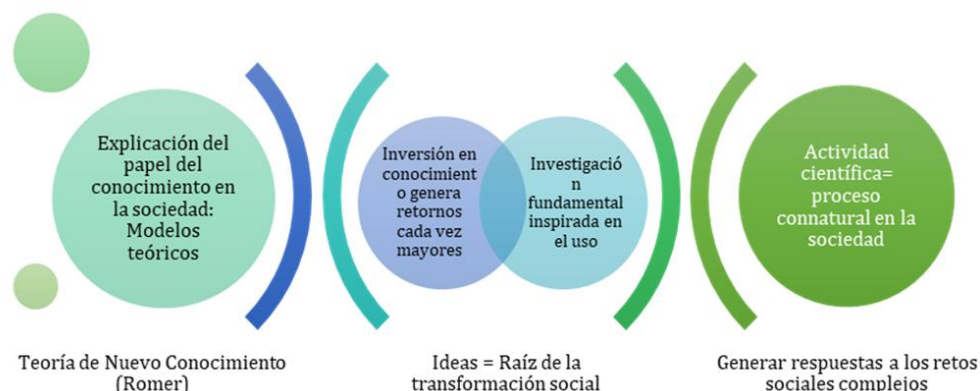
En referencia a las fuentes de financiación para la innovación empresarial, la información histórica de la Encuesta de Innovación EDIT del [19], destaca los resultados presentados en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Fuentes de financiación de la innovación en billones de pesos, periodo 2005 – 2014 (A partir de [19])

Año	Financiación empresarial	Financiación banca privada*
2006	67,20%	n.d
2007	76,00%	21,40%
2009	78,90%	17,70%
2010	74,90%	21,60%
2011	77,10%	20,10%
2012	75,00%	20,90%
2013	82,90%	11,40%
2014	80,90%	13,50%

\*La información presentada corresponde a la información histórica y boletines técnicos presentados por el DANE, el porcentaje restante de financiación no se especifica en la información revisada.

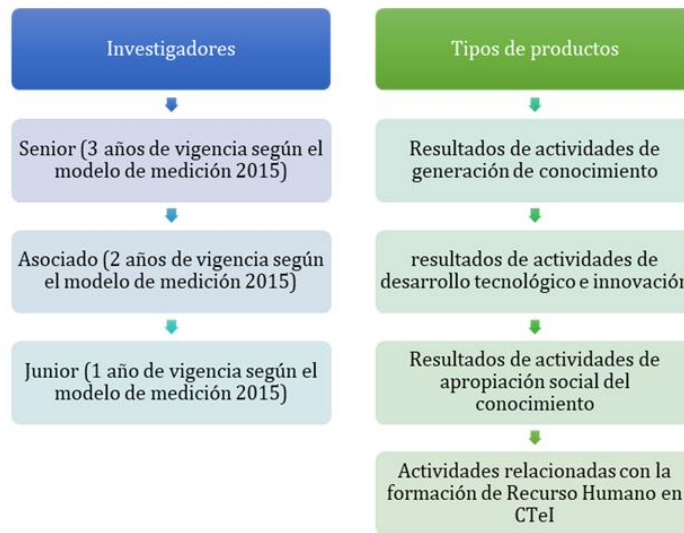
En lo referente al aspecto de generación de conocimiento y capacidades científicas en Colombia, es relevante destacar que Colciencias, como órgano rector del sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación del país, establece un modelo de medición y reconocimiento de los investigadores y grupos de investigación del país, de acuerdo con unas tipologías de productos y condiciones de trayectoria académica establecidas en el mismo. La Figura 4 presenta la base conceptual del modelo de medición de grupos de investigación, desarrollo tecnológico o de innovación y de reconocimiento de investigadores de [20].



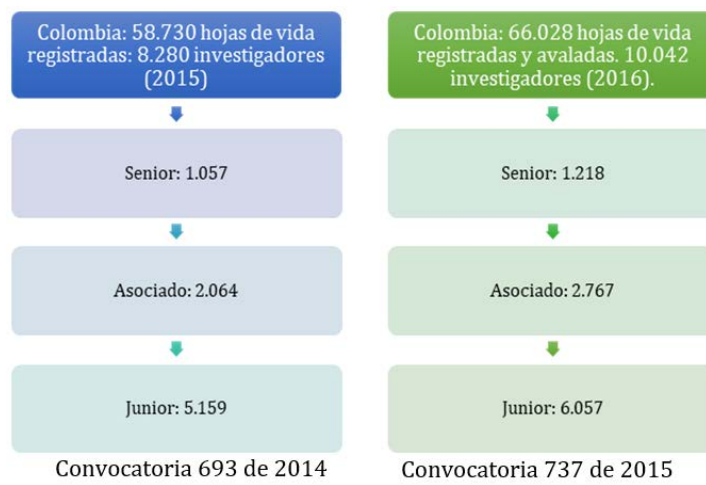
**Figura 4.** Bases del modelo de medición y reconocimiento de investigadores de Colciencias 2015 (A partir de [20])

En cuanto a las generalidades del modelo de medición en Colombia, como parte de su misión Colciencias identifica las instituciones o personas que participan en ACTI como soporte para: proveer información actualizada de grupos e investigadores, establecer las capacidades de Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), talento humano y apropiación social, evaluar el potencial de los grupos y actores del SNCTeI, diseñar, implementar y evaluar políticas de CTeI, determinar evolución de las líneas de investigación e identificar el recurso humano involucrado en CTeI [17]. El modelo de medición para el reconocimiento de investigadores en Colombia ha venido analizándose en los diferentes periodos, específicamente en los años 2010 – 2012 el nuevo modelo de medición, incluye los aspectos referenciados en la Figura 5.

En el caso de Colombia, el número de investigadores presenta una tendencia de crecimiento, pasando de 8.280 investigadores en el año 2014 a 10.042 en el año 2015. Colombia, el grueso número de investigadores se encuentran en la mínima categoría (junior), lo cual responde a los procesos de formación de capital humano en investigación, desde las políticas públicas de Ciencia, Tecnología e Innovación (Figura 6).

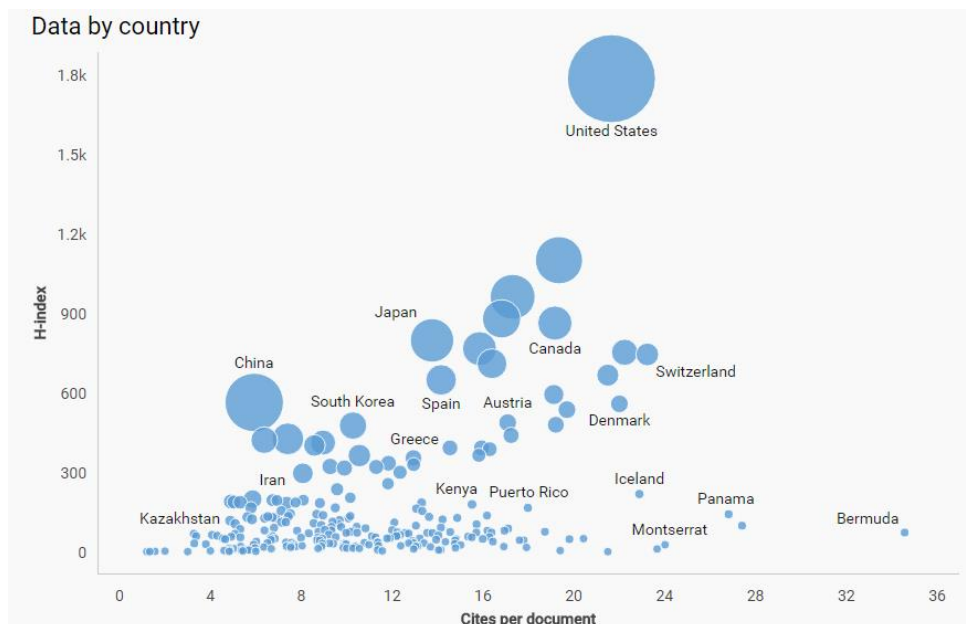


**Figura 5.** Modificaciones al modelo de medición de Colciencias en el periodo 2010-2012 [20]



**Figura 6.** Número de investigadores en Colombia, 2015 – 2016 [20]

En lo referente a la calidad de la producción científica en Colombia, de acuerdo con la Figura 7, el país se encuentra en la posición 50 en el Ranking de Scimago, en las primeras posiciones se ubica respectivamente: Estados Unidos, China, Reino Unido, Alemania, Japón y Francia. En el ámbito latinoamericano, Brasil es el país con mejor posición, ubicado en el puesto 15, seguido de México, en la posición 29, Argentina (37), Chile (45) y Venezuela en la posición 59 de este ranking [21].

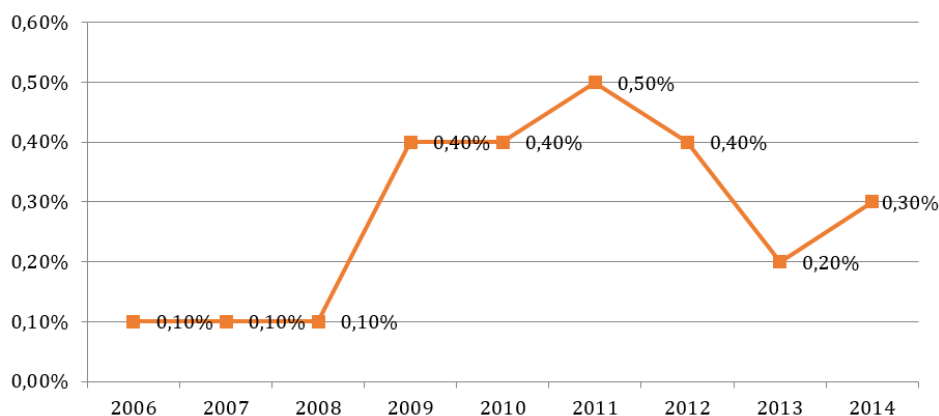


**Figura 7.** Datos por país Ranking de Scimago\_ H-Index Vs citas por documento [21]

En este sentido, se analiza la participación de doctores en el personal ocupado en la industria a nivel nacional. La Tabla 4 y la Figura 8 presentan los resultados del porcentaje de doctores de acuerdo con la información histórica de la encuesta EDIT publicada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE [19].

**Tabla 4.** % de Doctores del personal ocupado en la industria en Colombia 2006 – 2014 [19]

Año	% de Doctores del personal ocupado en la industria
2006	0,10%
2007	0,10%
2008	0,10%
2009	0,40%
2010	0,40%
2011	0,50%
2012	0,40%
2013	0,20%
2014	0,30%



**Figura 8.** % de Doctores del personal ocupado en la industria en Colombia, periodo 2006 – 2014 A partir de [19]

En referencia a la formación doctoral en Colombia, [14], destaca que la formación de capital humano en investigación, especialmente, doctores es una inversión estratégica para el país. En este sentido, en el año 2015 se registró un total de 5,6 doctores por millón de habitantes; por lo que la política pública en referencia propone el apoyo a 25.213 doctores, sin embargo, faltarían 16.937 para alcanzar el nivel de Brasil en 2025 (Figura 9).



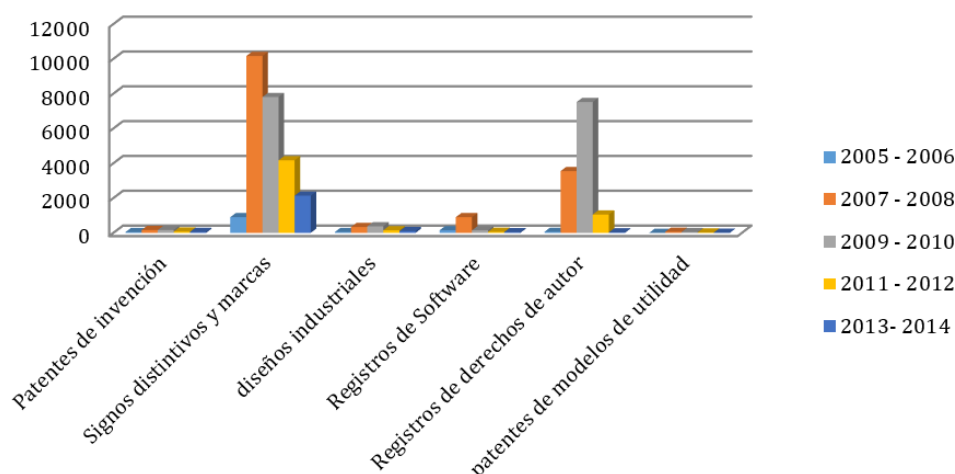
**Figura 9.** Doctores necesarios para alcanzar los niveles de Brasil en 2025 [14]

Nota: Se hace el supuesto de una tasa de graduación de los doctores apoyados del 90%

Adicionalmente, la encuesta de innovación EDIT del [19], destaca la tendencia de la propiedad intelectual de las empresas del país, presentadas en la Tabla 5 y la Figura 10.

**Tabla 5.** Propiedad intelectual de las empresas del país de acuerdo con información histórica de las encuestas EDIT [19]

Año	Patentes de invención	Signos distintivos y marcas	diseños industriales	Registros de Software	Registros de derechos de autor	patentes de modelos de utilidad
2005 - 2006	46	903	52	151	58	2
2007 - 2008	164	10.162	340	904	3.552	66
2009 - 2010	166	7.807	376	150	7.521	47
2011 - 2012	76	4.171	150	61	1.057	24
2013 - 2014	53	2.137	102	44	29	11



**Figura 10.** Propiedad intelectual de las empresas del país de acuerdo con información histórica de las encuestas EDIT [19]

Otro elemento relevante en el análisis de la dinámica de innovación es la apropiación social del conocimiento. En este ámbito a nivel de políticas públicas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) en Colombia, existen elementos normativos direccionados a la promoción y fortalecimiento de las actividades de apropiación social del conocimiento como parte del quehacer de los investigadores del país. Específicamente, la Política de Apropiación Social de la Ciencia, la cual tenía como objetivo “convocar y movilizar a la sociedad colombiana para crear una atmósfera nacional de interés y compromiso en torno a la Ciencia y la Tecnología como estrategia de futuro” [22].

Posteriormente, Colciencias planteó la “Estrategia nacional de apropiación social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación”, en el que se plantea que “las actividades científicas, tecnológicas y de innovación son prácticas sociales, lo que implica que son un asunto que le concierne y en las que participa, activa o pasivamente, la sociedad en su conjunto” [23]. Adicionalmente, este documento destaca que durante más de cuatro décadas Colciencias ha desarrollado diferentes programas y estrategias para articular el conocimiento científico y la sociedad. Adicionalmente, el Plan y acuerdo Estratégico departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación del departamento del Cesar, tiene como línea programática el fomento del talento científico, investigador y creativos en niños, niñas, jóvenes de la población educativa del departamento, con el objeto de fortalecer una cultura ciudadana de CTeI en el departamento del Cesar, el acuerdo con la apuesta del gobierno nacional, relacionada con la consolidación de una cultura que valora y gestiona el conocimiento [17].

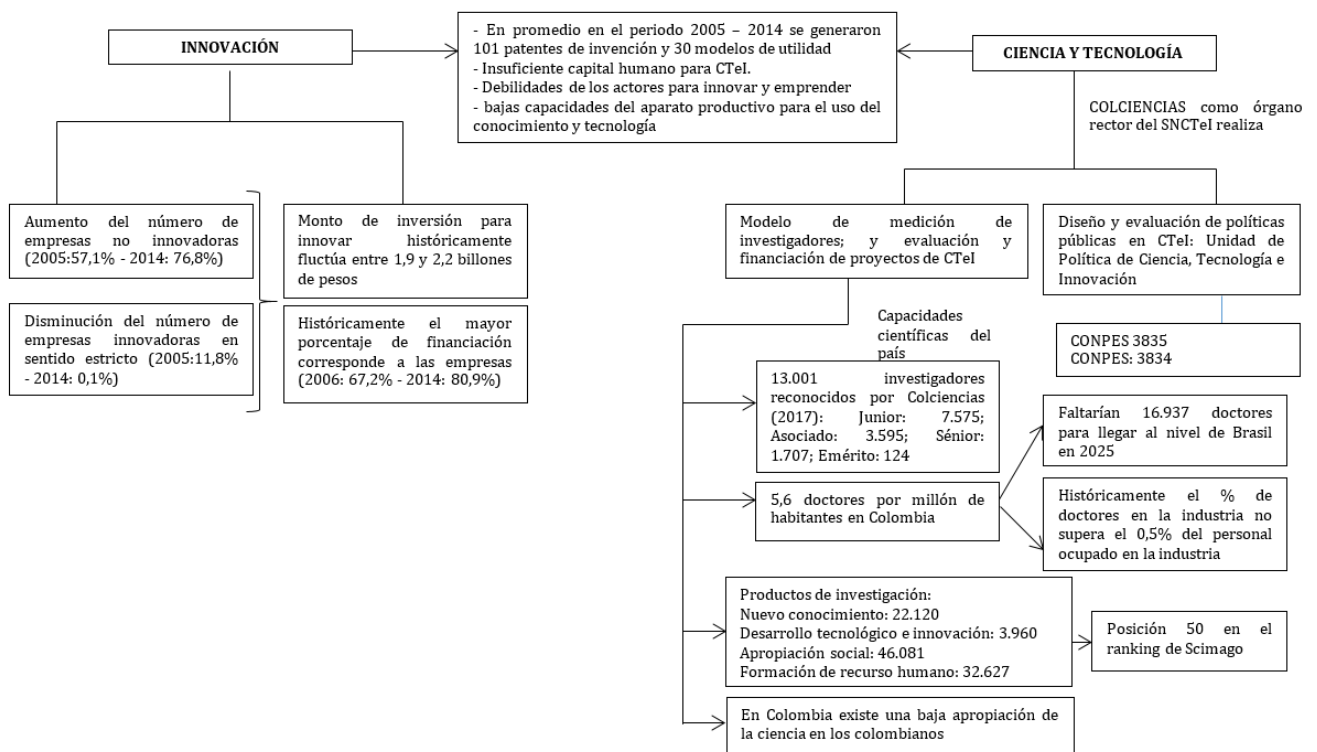
En lo referente a los productos de los investigadores colombianos, 22.120 corresponden a generación de nuevo conocimiento, 3.960 a actividades de desarrollo tecnológico e innovación, 46.081 a actividades de apropiación social del conocimiento y 32.627 a formación de recurso humano [24]. Las cifras anteriores evidencian que la producción de investigadores colombianos se concentra en actividades de apropiación social del conocimiento. Del mismo modo, analizando la producción de los grupos de investigación en el departamento del Cesar, según la convocatoria 693 de 2014 realizada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias, se registran 1949 productos en el departamento, de los cuales el 14,7% corresponde a nuevo conocimiento, el 4,9% a desarrollo tecnológico e innovación, el 34,4% a apropiación social del conocimiento y el 46,1% a la formación de recursos humanos para CTeI [17].

En contraste con lo anterior, la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación proyectada para el periodo 2015 - 2025, se destaca la existencia de una “baja mentalidad y cultura de la ciencia y la tecnología en la sociedad colombiana”, lo anterior, sustentado en los resultados de la III Encuesta Nacional de Percepción Pública de la Ciencia y la Tecnología, patrocinada por Colciencias y Coordinada por el Observatorio de Ciencia y Tecnología (OCyT) para identificar la opinión y actitudes de los colombianos sobre la ciencia y la tecnología. Los resultados de la encuesta en referencia presentan una baja valoración y apropiación social de la ciencia y la tecnología y un bajo interés para adoptar la vocación científica en niños y jóvenes del país [14].

Las cifras anteriores evidencian una contradicción desde en la dinámica de CTeI en Colombia: la mayor proporción de la producción de los científicos colombianos se concentra en la realización de actividades de apropiación social del conocimiento, sin embargo, existe una baja apropiación del conocimiento, de allí, resulta fundamental establecer estrategias que permitan mejorar la apropiación del conocimiento en la sociedad, como un elemento potencialmente transformador de la dinámica socioeconómica del país.

#### 4. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN I+D+I DESDE LA PERSPECTIVA COMPLEJA

Desde el análisis del presente capítulo, se realiza un análisis de las variables que inciden en el desarrollo de la investigación y desarrollo en Colombia, y su impacto en los procesos de innovación y apropiación social del conocimiento (Figura 11).



**Figura 11.** Análisis de la relación entre los procesos científicos, tecnológicos y de innovación desde una perspectiva compleja [14, 19]

La Figura 11 ilustra el panorama de la innovación en Colombia, y, por otro lado, las capacidades científicas y tecnologías del país, este análisis pone de manifiesto la necesidad de una mayor transferencia entre la actividad científica y tecnológica y la innovación, tomando como referencia el número de patentes en el sector industrial en el periodo 2005 – 2015. Puntualmente, en el periodo en referencia se generaron 101 patentes de invención y 30 modelos de utilidad. En este mismo sentido, la falta de capital humano específicamente de doctores en el país, que constituye un objetivo estratégico para la competitividad del sistema. Adicionalmente, se destacan las debilidades de los actores para innovar y emprender y las bajas capacidades del aparato productivo para el uso del conocimiento y tecnología. En este orden de ideas, el diagnóstico realizado en el marco de la política pública de ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia, relaciona las siguientes debilidades [14]:

- Insuficiente capital humano para la realización de actividades de ciencia, tecnología e innovación con criterios de calidad y pertinencia
- Desbalance sectorial en la vinculación del capital humano para realizar actividades de CTI
- I+D: baja generación de conocimiento de alto impacto que dé respuesta a las necesidades y oportunidades sociales y de desarrollo productivo del país
- Insuficientes capacidades para realizar I+D
- Desbalance en el esquema de incentivos a la producción científica
- Baja proyección internacional de la I+D
- Bajo direccionamiento estratégico de la I+D
- Debilidades en los agentes y sus relaciones para innovar y realizar emprendimiento
- Débiles mecanismos de apoyo a la financiación de la innovación y el emprendimiento
- Bajas capacidades del aparato productivo para el uso del conocimiento y la tecnología existente
- Las instituciones generadoras de conocimiento (IGC) tienen dificultades para transferirlo al aparato productivo
- Débil esquema de servicios de apoyo a la TCT y desvinculación de actores
- Desarticulación de actores que promueven, gestionan y desarrollan procesos de apropiación social de CTI
- Baja participación de la ciudadanía en actividades de CTI
- Débiles sistemas de seguimiento e indicadores de impacto a los procesos de apropiación social de la CTI
- Debilidades en la arquitectura institucional de la CTI
- Debilidades en el diseño, seguimiento y evaluación en CTI
- Baja inversión pública y privada en actividades de CTI

## 5. PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO

Diversos autores han realizado análisis de las políticas públicas de innovación, en este sentido, considerados los postulados de [25]; se plantean las propuestas de mejoramiento desde cinco factores en los que se fundamentan las estrategias de políticas públicas para el desarrollo de las capacidades de I+D+i, presentados en la Figura 12.



**Figura 12.** Factores a considerar para el desarrollo de estrategias de políticas pública de innovación

La Tabla 6 presenta la relación entre los factores identificados en la Figura 12 y las estrategias planteadas por los autores [25].

**Tabla 6.** Relación entre los factores y las estrategias de políticas públicas de innovación

Factores identificados	Estrategias planteadas en [25]
Fortalecimiento de infraestructura científica y tecnológica	Dotación de equipos e instrumentos especializados a los laboratorios y centros de I+D
Fortalecimiento de talento humano en CTeI	Incrementar el número de investigadores. Movilidad de investigadores. Formación en ingeniería y ciencias básicas.
Apropiación de políticas públicas de la innovación en el sector productivo	Programas de divulgación de políticas públicas de I+D+i para innovar. Apoyar al sector productivo con la innovación mediante proyectos. Mecanismos de cooperación con actores de innovación.
Diseño de instrumentos de políticas pública para fortalecer la innovación	Creación de fondos regionales de capital de riesgo de I+D. Flexibilización de condiciones financieras públicas y privadas que garanticen la financiación de I+D.
Evaluación y seguimiento de políticas públicas de innovación	Establecimiento de metodología para la evaluación sistémica de resultados de innovación. Garantizar la ejecución de políticas industriales en materia de sustitución de importaciones.

## 6. CONCLUSIONES

La innovación es una característica de éxito en las actuales estructuras de negocios, una capacidad que las organizaciones aprenden a gestionar, documentar, cuantificar y mejorar en el desarrollo de sus procesos productivos, aprendizaje que supone que las organizaciones flexibilicen sus estructuras con el objeto de definir las bases del modelo de gestión y traducirlo en valor agregado.

Adicionalmente, para el desarrollo efectivo de innovaciones en el sector productivo y el diseño de políticas públicas en esta materia, se recomienda fortalecer los mecanismos de articulación entre los diferentes actores del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación, estableciendo incentivos y políticas de apoyo para lograr la articulación y aprovechamiento de todas las capacidades generadas en el sistema. Adicionalmente, es relevante orientar los programas de formación en ciencia y tecnología a las necesidades y vocaciones de las regiones en aras de fortalecer la pertinencia y la apropiación entre la generación del conocimiento y las problemáticas del sector productivo.

Por otro lado, es relevante generar estrategias efectivas para lograr la apropiación de mecanismos diseñados en las políticas públicas en el sector productivo, y en esa misma medida, fortalecer los procesos de los procesos de evaluación sistemática de las políticas públicas para identificar el impacto y las estrategias de mejoramiento para lograr un desarrollo efectivo de la innovación en el sector productivo, apoyado en la generación de capacidades científicas y tecnológicas.

Los procesos de investigación, desarrollo e innovación, en esencia, corresponde a la generación y aplicación de conocimiento para la resolución de problemas de la realidad o vacíos existen en la teoría. En este sentido, los productos científicos y tecnológicos deben impactar y transformar las condiciones de vida una sociedad determinada. Así, es fundamental desarrollar la cultura y la conciencia de aplicación del conocimiento científico y tecnológico en la vida de los ciudadanos, actividad denominada, apropiación social de conocimiento.

La ciencia tiene un rol de agente transformador de realidades, en este sentido, el resultado de la actividad de ciencia, tecnología e innovación debe impactar el desarrollo de la sociedad, lo cual corresponde a la esencia de la apropiación social del conocimiento. Al respecto, en Colombia existe una notoria particularidad, dado a que la mayor parte de la producción de los investigadores corresponde a apropiación social del conocimiento, sin embargo, existen bajos niveles en cuanto a la percepción de la CTeI por parte de la sociedad.

En este sentido, el mejoramiento de los procesos de apropiación social y transferencia del conocimiento científico y tecnológico hacia la sociedad, permitirá aumentar la productividad y competitividad de las empresas, y fortalecer la calidad del sistema educativo colombiano. Así, la búsqueda de una sociedad educada y de empresas más productivas son pilares fundamentales para el desarrollo de una sociedad en el contexto actual.

De otro lado, el presente capítulo evidencia los retos del país para lograr una articulación efectiva en materia de ciencia, tecnología e innovación, para ello es fundamental plantear estrategias y mecanismos de seguimiento desde cada uno de los actores del sistema nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación: por parte de Estado, es fundamental establecer mecanismos para la financiación y el seguimiento de las políticas públicas, que permitan un desarrollo efectivo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación en el país. Por parte de la academia, es fundamental considerar un enfoque de la ciencia desde la pertinencia de los sectores productivos, apuntando a la solución de las necesidades para aumentar el número de patentes y de innovación en Colombia.

Finalmente, es fundamental establecer mecanismos para estimular la inversión privada en Ciencia, Tecnología e Innovación, y lograr una mayor inversión del sector productivo en los procesos científicos y tecnológicos. Por su parte, es fundamental apropiarse a la población en general de la importancia de los procesos de CT&I. La articulación de los sectores y el seguimiento a los mecanismos de política pública, corresponden a pilares fundamentales para el desarrollo científico, tecnológico y de innovación del país.



## REFERENCIAS

- [1] Schumpeter, J. (1934). *The Theory of Economic Development*. Harvard University Press.
- [2] OECD & Eurostat (2005). *Manual de Oslo. Guía para la recogida e interpretación de datos sobre Innovación*. Grupo Tragsa.
- [3] RICYT et al. (2001). *Normalización de indicadores de innovación tecnológica en América Latina y el Caribe: Manual de Bogotá*.
- [4] García, A. & Molero, J. (2008). *Innovación en servicios en la UE: Densidad de innovación y preeminencia económica de los innovadores*. Tribuna de Economía ICE.
- [5] Schumpeter, J. (1939). *Business Cycles: A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. McGraw-Hill.
- [6] Griliches, Z. (1986). Productivity, R&D and basic research at the firm level in the 1970s. *American Economic Review* 76(1), 141-154
- [7] Freeman, C. (1994). Critical survey: The economics of technical change. *Cambridge Journal of Economics* 18(5), 463-514.
- [8] Rouvinen, P. (2002). Characteristics of Product and Process Innovators: Some Evidence from the Finnish Innovation Survey. *Applied Economics Letters* 9(9), 575-580.
- [9] Rostow, W. (1960). *The Stages of Economic Growth*. Cambridge University Press.
- [10] Abramovitz, M. (1986). Catching up, forging ahead, and falling behind. *Journal of Economic History* 46(2), 385-406.
- [11] Cohen, W. & Levinthal, D. (1989). Innovation and Learning: The Two Faces of R&D. *The Economic Journal* 99(397), 569-596.
- [12] Consejo Nacional de Política Económica y Social (2009). *Política nacional de ciencia, tecnología e innovación*. Bogotá.
- [13] Congreso de la Republica de Colombia (2009). Ley 1286 de 2009: Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en Departamento Administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia y se dictan otras disposiciones.
- [14] Consejo Nacional de Política Económica y Social de Colombia (2015). *Política Nacional de Ciencia, tecnología e Innovación 2015-2025: Versión Borrador*.
- [15] Consejo Nacional de Política Económica y Social de Colombia (2015). Documento CONPES 3834: lineamientos de política para estimular la inversión privada en ciencia, tecnología e innovación a través de deducciones tributarias.
- [16] Unidad de Diseño y Evaluación de Políticas (2016). *Departamento Administrativo de Ciencia, tecnología e Innovación de Colombia*.
- [17] Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (2015). *Colciencias presenta su Unidad de Política de Ciencia Tecnología e Innovación*.
- [18] Foro Económico Mundial (2015). *Reporte Global de Competitividad 2014-2015. Síntesis de resultados para Colombia*.
- [19] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (2015). *Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica - EDIT*.
- [20] Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (2015). *El estado de la ciencia en Colombia*.
- [21] Scimago Journal & Country Rank. (2016). [World Report](#). Online [Nov 2017].
- [22] Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (2005). *Política de Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación*.
- [23] Departamento Administrativo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (2010). *Estrategia Nacional de apropiación social de la Ciencia, la tecnología y la Innovación*.
- [24] Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (2015). *Indicadores de Ciencia y tecnología 2015 Colombia*.
- [25] Piñero, A. Arzola, M. & Rodríguez, C. (2011). Estrategias de políticas públicas de innovación para el desarrollo de las capacidades de las I+D+I, en las PYMIS del Estado Bolívar, Venezuela. *Ingeniería y Sociedad* 6(1), 32-41.

El uso de computadores para analizar y resolver problemas, es actualmente el mecanismo más usado en casi todos los campos de la vida. Sin embargo, se considera que su diseño e implementación está ligado exclusivamente a la construcción de modelos matemáticos, este artículo pretende iniciar la reflexión sobre cómo, el desarrollo de un pensamiento computacional en las mentes jóvenes, permite fortalecer niveles de competencias genéricas orientadas a la resolución de problemas y razonamiento analítico. El enfoque central de esta investigación presenta los resultados del ejercicio, al diagnosticar las competencias de razonamiento analítico y sintético y solución de problemas, de un grupo de 37 niños de 9 a 10 años de una escuela del municipio de Aguachica, Cesar, por medio de la cuantificación de los resultados de ejercicios prácticos asociados a estas competencias, seguidamente de introducir el concepto de pensamiento computacional, como estrategia para desarrollar y potencializarlas, por medio del lenguaje de programación Scratch, dentro de la práctica de ejercicios evaluados dentro de la observación. Finalmente, se concluye que los estudiantes tienen un mejor desempeño al realizar ejercicios prácticos, donde el razonamiento analítico y sintético se encuentra mejor evaluado por el uso del computador, de la misma forma los tiempos para el desarrollo de ejercicios en el lenguaje Scratch genera respuestas de creatividad y proposición a la resolución de problemas más rápidas. Esto incentiva a realizar experiencias en lenguajes de programación como principal estrategia para la evolución de las ciencias computacionales.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es imprescindible el uso de las tecnologías en todos los aspectos de la vida, sin embargo, se está haciendo énfasis en educar sobre lo creado y no en educar para crear tecnología, en otras palabras, nuestros jóvenes solo son usuarios y no programadores. El uso de la programación, permite desarrollar en mentes jóvenes o en aprendizaje temprano, competencias genéricas de razonamiento analítico y sintético y de solución de problemas.

Estudios como el descrito en el artículo *Effects of Logo and CAI environments on cognition and creativity* [1] han demostrado que la habilidad de programación, desarrolla como efecto, mejores resultados en pruebas matemáticas, de razonamiento, solución de problemas y creatividad. Para esto existen herramientas como Scratch, que es un lenguaje de programación visual con el que se busca hacer una introducción hacia el mundo de la programación, es usado con frecuencia en escuelas y colegios para promover no solo el uso, sino la creación de contenidos informáticos.

La presente investigación busca medir el impacto del pensamiento computacional a partir del aprendizaje en programación con lenguaje Scratch, en el desarrollo de competencias abstractas del pensamiento, específicamente razonamiento analítico y sintético y solución de problemas; en niños de 9 a 10 años, tomando como referente el desarrollo de ejercicios prácticos, por consiguiente se presenta el análisis de datos a partir de la observación y la evaluación de variables en la resolución de problemas, resultado de talleres realizados en diferentes periodos.

## 2. EL PENSAMIENTO COMPUTACIONAL

El Ministerio de Educación Nacional [2] establece que es un reto apostar por competencias genéricas que sean transversales a todos los niveles educativos y a los diferentes énfasis y programas de formación, como una respuesta a las necesidades de la sociedad actual. El aprendizaje para toda la vida, la comprensión de contextos y situaciones que exige la toma de decisiones argumentada, las posibilidades de análisis y de crítica ante diversos enunciados, se han identificado como competencias, que deben ser fuertemente desarrolladas ante el cambiante estado de las tecnologías de la información y la comunicación y el vertiginoso avance de los conocimientos sobre aquellos aspectos que demanda la sociedad de los futuros profesionales, universitarios, técnicos o tecnólogos.

El pensamiento computacional implica resolver problemas, diseñar sistemas y comprender el comportamiento humano, haciendo uso de los conceptos fundamentales de la informática [3]. La educación en Colombia debería apuntar a desarrollar no solo competencias genéricas, sino aquella competencia que abarque todas las necesarias en el mundo actual, como es el pensamiento computacional.

La necesidad por el desarrollo de competencias, los bajos indicadores académicos y las brechas sociales entre los diferentes entornos educativos nacionales requieren especial atención y diseño de estrategias con nuevos contextos para la formación de jóvenes con un aprendizaje más significativo, con mayor capacidad de atención, mayor autonomía y placer por el descubrimiento de nuevos conceptos. Es por esto que se introduce la tecnología como una herramienta para el desarrollo del pensamiento computacional que a su vez puede derivar en otros beneficios, tal como el desarrollo de estas competencias.

---

<sup>1</sup> [laurengomez@unicesar.edu.co](mailto:laurengomez@unicesar.edu.co)

En la investigación “Estado del arte sobre experiencias de enseñanza de programación a niños y jóvenes para el mejoramiento de las competencias matemáticas en primaria” [4], determinaron que mediante la revisión del estado del arte en cuanto a experiencias significativas de enseñanza en lo referente a la comprensión y el desarrollo de los primeros algoritmos se lograron determinar importantes aspectos. En cuanto a las temáticas y contextos adecuados de enseñanza de la programación para niños, se establece un conjunto de temas en las áreas de matemáticas, estadística y geometría que podrían ser abordados mediante aplicaciones prácticas algorítmicas, utilizando para ello varias estructuras de programación a nivel básico, como el uso de variables y diversas estructuras de control.

Sobre las características de herramientas adecuadas para la programación en niños, aunque es obviamente necesario que éstas puedan cubrir las estructuras que se pretenden enseñar, es también necesario contar con una aplicación cuyo formato de código tenga una sintaxis muy fácil de entender, con una interfaz en el idioma nativo donde se aplique (en este caso español), de ser posible que cuente con un modo gráfico y que permita depurar código de una forma sencilla, mostrando mensajes de error explicando sobre el mismo y la posible forma de generar una solución, con el fin de no desviar la atención en lo realmente importante como es el desarrollo del pensamiento algorítmico.

Respecto de las técnicas de aplicación de la enseñanza de la programación en el aula, se observa que la generación de proyectos que planteen situaciones particulares y el uso de los juegos con objetivos, reglas y niveles definidos y enlazados mediante una historia de fondo, entre otras, son adecuadas para brindar una enriquecedora experiencia de enseñanza de la programación en los niños. A su vez, debe pensarse en la generación de un curso apropiado para niños entre 8 y 11 años, edad en la que cuentan ya con la habilidad de comprender procesos abstractos en forma sistemática y creativa.

Por otra parte, a la luz de los resultados obtenidos en la investigación “Experiencias Prácticas con el Uso del Lenguaje de Programación Scratch para Desarrollar el Pensamiento Algorítmico de Estudiantes en Chile” [5], Scratch es una herramienta adecuada para la educación escolar por su versatilidad y posibilidades que ofrece a través del uso de recursos multimedia como sonido, gráfica y movimiento. Desde este punto de vista, permite el uso de técnicas de visualización para conjeturar y experimentar soluciones a problemas de diversa índole. En efecto, el contexto presentado en el experimento que se reporta en este artículo permite, con algunas modificaciones, plantear problemas de tipo geométrico relativos a triángulos u otras figuras planas.

Otros estudios como “Entorno de aprendizaje para la enseñanza de programación en Arduino mediado por una mano robótica didáctica” [6], confirman la necesidad de que los ciudadanos desde la educación básica se aproximen a la programación en contextos didácticos, que les permitan entender el funcionamiento de aparatos que irrumpen con gran fuerza en la cotidianidad, afectando la forma en que nos interrelacionamos con el mundo.

### 3. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN PARA MENTES JÓVENES

Enseñar programación no consiste en enumerar una serie de estructuras de programación indicando para que sirve cada una de ellas. Es mucho más que eso, se trata de que el estudiante aprenda a pensar, a analizar una situación y a diseñar el método de resolución más adecuado, dejando al margen el lenguaje de programación. Se trata de un objetivo muy complejo. Para cualquier persona diseñar la solución a un problema requiere de un esfuerzo importante de abstracción, aún más si tiene que expresarla en forma de un algoritmo [7].

Iniciativas en otros países como los proyectos Code.org... o Scratch entre muchos otros, buscan que, mediante la programación, los estudiantes aprendan a pensar creativamente, razonar sistemáticamente y trabajar colaborativamente, incluso desde temprana edad... En palabras de muchos investigadores, la enseñanza de la programación puede hacer que los niños mejoren las habilidades de pensamiento y resolución de problemas. De acuerdo con Delgado et al. (2013): “la programación de ordenadores aporta algo positivo y diferente a la formación de una persona: hábitos y conocimientos que tienen un cierto valor práctico en el día a día de, como mínimo, cualquier persona que viva en un entorno urbano del primer mundo” [4]. A continuación, se relacionan algunas de las herramientas que actualmente se están utilizando en todo el mundo para la programación a temprana edad:

1. *Scheme*: es un lenguaje de programación que surgió en los laboratorios del MIT en 1975, cuando Guy L. Steele y Gerald J. Sussman buscaban un lenguaje con una semántica muy clara y sencilla. Pensaban que los lenguajes no se deberían desarrollar añadiendo muchas características, sino quitando las debilidades y las limitaciones que hacen que las características adicionales parezcan necesarias. Scheme es un dialecto de Lisp, es un lenguaje interpretado, muy expresivo y soporta varios paradigmas. Estuvo influenciado por el cálculo lambda. El desarrollo de Scheme ha sido lento, ya que la gente que estandarizó Scheme es muy conservadora en cuanto a añadirle nuevas características, porque la calidad ha sido siempre más importante que la utilidad empresarial. Por eso Scheme es considerado como uno de los lenguajes mejor diseñados de propósito general [8].
2. *Scratch*: es un entorno para enseñar conceptos básicos de programación a los niños y a las niñas. Fue desarrollado en el MIT, y permite comenzar a entender conceptos como ciclos, control de flujo, señales, etc. [9].
3. *Squeak*: es una herramienta informática singular que difícilmente se enmarca en cualquiera de las categorías de software conocidas. Esta dificultad de conceptualización del programa es la que provoca, a menudo, su descripción

a través de la comparación con otros programas o mediante circunloquios y perífrasis acerca de lo que no es. En un esfuerzo por resumir su naturaleza, podemos afirmar que Squeak es *un entorno de programación gráfico orientado a objetos* ideado como una herramienta válida para investigar, realizar simulaciones o explorar destrezas, que constituye un campo abierto a la imaginación y se presta de forma excepcional como herramienta capaz de facilitar el descubrimiento desde muy tempranas edades. [10]

4. *Storytelling Alice*: Los contenidos, aquello de lo que tratan los relatos y la estructuración de los mismos queda a voluntad de los usuarios. Si bien, el programa ofrece una serie de galerías de escenarios, personajes y acciones, el usuario puede hacer con éstos lo que quiera, en una muy variada serie de posibilidades. Es decir, no existe un contenido secuenciado y precargado sobre el cual se genere algún tipo de cambio. Dentro del entorno de *Storytelling Alice*, se conoce como “mundo” a cada una de las animaciones a crear. Cada mundo se convierte en película animada 3D mediante los siguientes pasos:
  - Elección de entorno y escenario.
  - Elección de personajes y programación de sus movimientos, diálogos e interacciones sociales e interacciones con el entorno.
  - Elección de objetos, iluminación, movimientos de cámaras, etc. según las necesidades de cada historia.
  - Resultado final es la ya mencionada película animada en 3D. [11]
5. *Processing*: Processing es un dialecto de Java que fue diseñado para el desarrollo del arte gráfico, para las animaciones y aplicaciones gráficas de todo tipo. Desarrollado por artistas y para artistas. Es un software basado en Java y, por lo tanto, multiplataforma. Desarrollado a partir del 2001 por el más que conocido departamento del MIT, el Media Lab. Los creadores, Casey Res y Ben Fry, son discípulos del profesor John Maeda creador del método DBN (Design By Numbers) que, en los años 90, pretendía introducir a la programación a diseñadores, artistas y no programadores de una forma sencilla. Precisamente Processing está inspirado en DBN que en la actualidad ya no está activo. [12]
6. *Python*: es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. La elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de éste un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas. El intérprete de Python y la extensa biblioteca estándar están a libre disposición en forma binaria y de código fuente para las principales plataformas desde el sitio web de Python, <https://www.python.org/>, y puede distribuirse libremente. El mismo sitio contiene también distribuciones y enlaces de muchos módulos libres de Python de terceros, programas y herramientas, y documentación adicional. [13]

#### 4. MÉTODO Y RESULTADOS

Para el desarrollo de los objetivos de la investigación se utilizó la observación sistemática, este “es un método de investigación donde los eventos son seleccionados, registrados y codificados en unidades significativas” [14] pues se prepararon todas las condiciones para la realización de los ejercicios prácticos con estudiantes de 9 a 10 años, donde se registraron las acciones y su conducta. Para esto se definieron los tipos de conducta a observar en la medida que los niños realizaban los ejercicios tanto de diagnóstico, como de operación y se registraron de acuerdo a los códigos correspondientes.

La observación sistémica es un procedimiento por el cual recogemos información para la investigación; es el acto de mirar algo sin modificarlo con la intención de examinarlo, interpretarlo y obtener unas conclusiones sobre ello. El objetivo es definir de antemano varias modalidades de conducta y solicitar a los observadores que registren, cada vez que ocurra la conducta, el correspondiente código predefinido. Hay que entrenar a los observadores para que todos obtengan un protocolo similar. [14]

Para los diagnósticos se tomó como referencia los desempeños por competencia descritos en los Lineamientos Para La Formación Por Competencias En Educación Superior [2], en los apartados Razonamiento analítico y sintético y Solución de problemas, en 37 niños de 9 a 10 años, estudiantes de cuarto de primaria de una escuela de Aguachica.

#### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### 5.1 Diagnóstico de las competencias de razonamiento analítico y sintético y solución de problemas

La identificación del nivel de diagnóstico de las competencias, se realizó por medio de la aplicación presencial de dos ejercicios, los cuales se registraron de forma escrita así:

- *Razonamiento analítico y sintético*. Se aplicó el instrumento para la toma diagnóstico con el ejercicio “Construye un avión de papel paso a paso y en forma ordenada. Luego escribe en orden los pasos, para explicarle a otra persona como elaborarlo”. Se pidió a los participantes que describieran en nueve pasos la elaboración del avión con el fin de evidenciar el desempeño en la situación “Descompone una situación compleja en elementos simples e identifica las relaciones entre estos” con los resultados que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 39.** Observaciones resultado ejercicio 1

Observaciones
Once (11) estudiantes completaron la instrucción de describir la situación, en nueve pasos, Nueve (9) estudiantes en ocho pasos, Un (1) estudiante en siete pasos, Cuatro (4) estudiantes en seis pasos, Ocho (8) estudiantes en cinco pasos, Cuatro (4) estudiantes en cuatro pasos.
El 100% de los estudiantes coincido en identificar el primer y último paso de la situación
El 54% de los estudiantes se aproximaron a la descripción más acertada de los pasos más complejos para describir la elaboración del avión de papel.
El 24% de los estudiantes no se aproximaron a descomponer la situación de la elaboración del avión

De acuerdo con lo anterior, los participantes se acercaron a la solución del ejercicio de manera heterogénea y más por intuición que por razonamiento, al observar la descripción de los pasos para la construcción de papel, no se logra identificar la competencia para analizar y sintetizar las ideas, ni para descomponer la situación en elementos simples. Este resultado puede ser un indicador para trabajar en el desarrollo de las mentes jóvenes, teniendo en cuenta que hay que potenciar las capacidades de los niños.

- *Solución de problemas.* Se aplicó el instrumento para la toma diagnóstico con el ejercicio ¿Cuántos triángulos hay en la figura? Se pido a los participantes contar los triángulos representados en una figura geométrica con el fin de evidenciar el desempeño en la situación “identifica información relevante de un problema analizado,” como se puede observar en la Tabla 2. Se pudo observar como resultado principal, al no identificar información relevante de los problemas analizados, la capacidad de solución de problemas se dificulta y puede ser un aspecto que se debe abordar desde el pensamiento computacional.

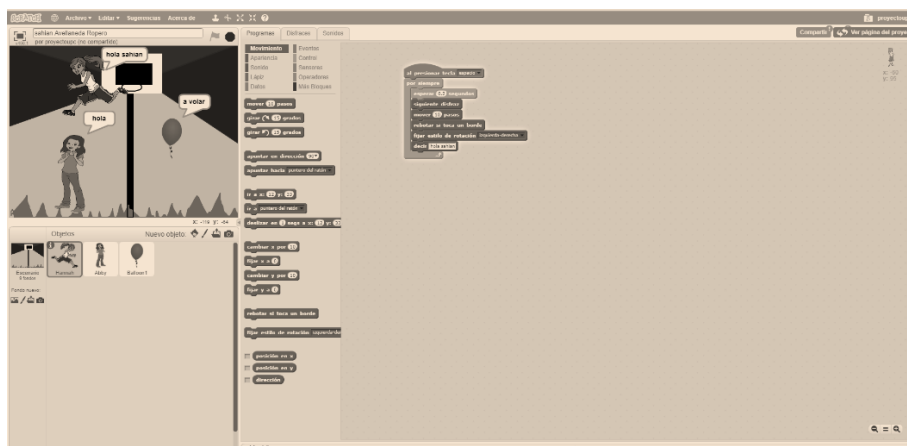
**Tabla 40.** Observaciones resultados ejercicio 2

Observaciones
Cuatro (4) estudiantes identifico once triángulos; y treinta y tres (33) estudiantes contaron 10 triángulos
El 11% de los estudiantes identifico un factor relevante del problema analizado
El 89% de los estudiantes no se aproximaron a identificar la información más relevante del problema analizado.

## 5.2 Desarrollo de competencias por medio del uso de Scratch

La realización de ejercicios prácticos permitió desarrollar una dinámica de creatividad y potenciar el pensamiento computacional, algunos de los niños nunca se habían puesto en contacto con el lenguaje Scratch, mientras otros ya lo conocían levemente. Se desarrollaron 31 ejercicios prácticos en dos sesiones:

1. La primera sesión apporto la introducción al lenguaje y a la comprensión sobre la programación, en qué y para que consistía. Se dio un ejercicio guiado, sobre el cual estaban claras las acciones y comandos que debían aplicarse, mientras que no se explicó el uso de las herramientas, como resultado cada niño, por medio de las competencias de la solución de problemas, fue encontrando las razones lógicas para su funcionamiento. Se observó dentro del ejercicio, que los niños encontraban relación entre la lógica del algoritmo propuesto y la situación real propuesta, cada participante observaba en la pantalla los resultados de aplicar algún comando, otro factor importante que se identificó por medio de la observación, fue que en todos los casos se necesitó de ensayo y error para lograr ejecutar una secuencia. Los niños que ya habían interactuado con el lenguaje de programación recordaban fácilmente los comandos, aquí se corrobora como en [4], que uno de los factores más importantes para el desarrollo del pensamiento computacional en mentes jóvenes se genera a partir de las interfaces con modo gráfico.
2. La segunda sesión se aplicó en modo libre, cada niño ingresó y realizó una propuesta de ejercicio como se observa en la Figura 1. Se pudo observar que el uso de los comandos parecía ser algo cotidiano, algo que se había realizado de manera automática. Los proyectos aunque imperfectos, se desarrollaron en tiempo record y se pudo comprobar que el sentimiento de búsqueda se amplió, al querer saber que más se podría hacer en el programa, la experiencia individual y creativa ratifica a [7] cuando se afirma que solucionar un problema requiere más que la abstracción, puesto que supone que el pensamiento aborde la situación desde enfoques diversos e imaginativos.



**Figura 1.** Ejercicio práctico (Prueba 2)

## 6. CONCLUSIONES

El pensamiento computacional es una habilidad que todos deberíamos desarrollar desde temprana edad, esto fundamentado en la era de tecnología por la cual atraviesa actualmente la humanidad. En la medida que los países busquen aumentar su competitividad e incursionar en economías globalizadas, los profesionales deben estar preparados no solo con conocimientos específicos sino con conocimientos emergentes, que sean capaces de transformar su entorno y evolucionar hacia desarrollos tecnológicos. Esto es lo que hoy se conoce como la sociedad del conocimiento.

Uno de los principales retos de las ciencias computacionales, es comprender que los grandes crecimientos no son solo aquellos relacionados con el principio de la máquina, sino que, por el contrario, llegar a la mayor cantidad de personas que logren programar y además que actúen en función de la programación es otra forma de extenderse como ciencia.

Como se observó en las revisiones teóricas, la mayoría de las investigaciones coinciden en que no se puede desconocer que la preparación en programación debe iniciar desde la más temprana edad posible y que esto facilita no solo las habilidades matemáticas para crear algoritmo, sino competencias genéricas para la solución de problemas y el pensamiento racional.

En el documental “Todo el mundo debería saber programar”, Mark Zuckerberg expreso “Creo que tienes que empezar desde pequeño, creo que uno de los errores más comunes sobre la informática y la programación en general, es que tienes que aprender una gran cantidad de cosas antes de poder hacer nada”

La presente investigación pudo establecer que las competencias genéricas en las mentes jóvenes podrían ser desarrolladas en niveles más altos y que actualmente el sistema educativo no relaciona el aprendizaje de la programación con el desarrollo de las mismas, cosa que retrasa en general las posibilidades de crear en los niños el pensamiento computacional.

Sobre identificar el nivel diagnóstico de las competencias de Razonamiento analítico y sintético y Solución de problemas en los niños de 9 a 10 años de edad, de cuarto de primaria de una escuela del municipio de Aguachica, se puede concluir que:

- Los estudiantes tienen un mejor desempeño al realizar ejercicios prácticos como la elaboración del avión
- Los estudiantes tienen un desempeño bajo al descomponer situaciones complejas
- Los estudiantes solo identifican información evidente y no profundizan al solucionar un problema
- Los estudiantes siguen instrucciones y aciertan en aplicar los métodos de acuerdo a la orientación

En la medida del uso de la programación en Scratch por medio de ejercicios se pudo identificar que el lenguaje de programación genera en las mentes jóvenes un nivel de competencias inicial que se puede fomentar con el desarrollo el desarrollo de situaciones complejas y ampliar la creatividad de los niños para la resolución de problemas, basados en el ensayo y error.

## REFERENCIAS

- [1] Clements, D. (1986). Effects of Logo and CAI environments on cognition and creativity. *Journal of Educational Psychology* 78(4), 309-318.
- [2] Ministerio de Educación Nacional (2012). Propuesta de lineamientos para la formación por competencias en educación superior.
- [3] Wing, J. (2006). Computational Thinking. *Communications of the ACM* 49(3), 33-35.
- [4] Palma, C. & Sarmiento, R. (2015). Estado del arte sobre experiencias de enseñanza de programación a niños y jóvenes para el mejoramiento de las competencias matemáticas en primaria. *Revista Mexicana de investigación educativa* 20(65), 607-641.
- [5] Vidal, C., Cabezas, C., Parra, J. & López, L. (2015). Experiencias Prácticas con el Uso del Lenguaje de Programación Scratch para Desarrollar el Pensamiento Algorítmico de Estudiantes en Chile. *Formación universitaria* 8(4), 23-32.
- [6] Niño, J. ET AL. (2017). Entorno de aprendizaje para la enseñanza de programación en Arduino mediado por una mano robótica didáctica. *Revista Espacios* 28(60), 23-43.
- [7] Compañ, P. et al. (2015). Enseñando a programar: un camino directo para desarrollar el pensamiento computacional. *Revista de Educación a Distancia RED* 46, 1-15.
- [8] Pomares, C. & Gallardo, D. (2014). Lenguajes y Paradigmas de Programación. Departamento Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad de Alicante.
- [9] [edulibre.info](http://edulibre.info). Online [Feb 2018].
- [10] [Instituto de Tecnologías Educativas](http://Instituto de Tecnologías Educativas). Online [Jun 2017].
- [11] [Teorias del aprendizaje en entornos virtuales](http://Teorias del aprendizaje en entornos virtuales). Online [ Feb 2018].
- [12] [Processing, el lenguaje para gráficos](http://Processing, el lenguaje para gráficos). Online [Feb 2018].
- [13] [Tutorial de Python](http://Tutorial de Python). Online [Jun 2017].
- [14] Bengurfa, S. et al. (2010). Observación. Universidad Autonoma de Madrid.

# Proyecto Integrador Corporación Universitaria Remington PICUR: Una estrategia innovadora para la formación de Ingenieros para el siglo XXI

Piedad M. Metaute P.<sup>1</sup>

Giovanny A. Flórez O.<sup>2</sup>

Mónica M. Córdoba C.<sup>3</sup>

Corporación Universitaria Remington  
Medellín – Antioquia

Este trabajo muestra el diseño de estrategia pedagógica denominada Proyecto Integrador Corporación Universitaria Remington PICUR, aplicable a diferentes pregrados tanto para modalidad presencial como virtual, fue fundamentado en resultados de la investigación “Estrategia Pedagógica para formadores y estudiantes del siglo XXI: Un aporte a la socio-afectividad y autogestión del conocimiento en los programas de ingeniería de Uniremington, acorde con las dinámicas cambiantes del mundo globalizado”, donde se revisaron fuentes científicas como trabajos de investigación, artículos, libros, revistas y experiencias significativas relacionadas con las competencias del ingeniero del siglo XXI, además de trabajo de campo aplicado a egresados de ingeniería de sistemas de Uniremington, donde se pudo realizar análisis sobre las competencias generadas desde el pregrado y las necesidades reales del contexto, siendo la base para la fundamentación de dicha investigación. Es así como la investigación en mención permite la generación de diez competencias que debe tener el ingeniero del siglo XXI, que al cruzarse con las competencias de cada una de las asignaturas de la ingeniería y las competencias evaluadas por el estado en las pruebas Saber Pro, permitió crear una matriz de competencias, siendo la base para el diseño de la estrategia pedagógica en mención, PICUR.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estrategia pedagógica PICUR, pretende generar aportes a la autogestión del conocimiento en los programas de ingeniería de Uniremington, acorde a las dinámicas cambiantes del mundo globalizado y se fundamenta en los resultados obtenidos de investigación que surge de la preocupación por ofrecer a la sociedad profesionales globales en ingeniería que desde su formación integral realicen grandes cambios y aportes a la sociedad.

PICUR, se enmarca en la solución de problemas bajo aportes investigativos e integración de saberes y disciplinas que se orienten hacia la creación, desarrollo y ejecución de proyectos, donde el pensamiento crítico, la autogestión del conocimiento sean los pilares para la consolidación de ideas innovadoras que desde las fundamentaciones teóricas se conviertan en construcciones prácticas, siendo las competencias de los profesionales en ingeniería, la puerta sobre la cual se vislumbran los aportes culturales, sociales, económicos, interdisciplinarios de la época actual y futura, donde se busca desarrollar competencias en Ingeniería, a partir de la solución de problemas del contexto y/o la generación de oportunidades, así como el desarrollo de competencias investigativas, el trabajo colaborativo, donde la interdisciplinariedad de diferentes áreas del saber, la autogestión del conocimiento y el fortalecimiento del pensamiento crítico, sean orientadas hacia la consolidación de proyectos que aporten a la parte económica, social y ambiental del país.

En ese sentido, las competencias como insumo para PICUR: El proyecto Integrador, pretende el logro de competencias, acorde a las necesidades sociales del ingeniero del siglo XXI, donde se incorpore competencias propias del perfil (Ingeniero) definido desde la misma universidad, como son las competencias que se generan a través del aporte de las ciencias básicas, las específicas de la ingeniería, la formación humanística y la investigativa.

De igual forma se incorporan competencias evaluadas por el Estado como ente validador de profesionales competentes, para aportar de forma significativa a los diferentes sectores, evaluando en éstos competencias genéricas, de fundamentación y específicas de dichos programas. En lo que respecta a las competencias que se requieren actualmente para el ingeniero del siglo XXI, éste deberá ser competente tanto en contextos locales, regionales, nacionales como internacionales ya que aportará hacia la solución de problemas, generación de oportunidades o nuevo conocimiento, con capacidad de interacción, multidisciplinariedad, para el desarrollo del pensamiento crítico, donde integre fundamentación teórica con práctica que se refleje en soluciones en proyectos reales para beneficio propio y de la sociedad.

## 2. METODOLOGÍAS ACTIVAS EN EDUCACIÓN PARA LAS INGENIERÍAS

La sociedad actual requiere de profesionales altamente competentes no solo para desempeñarse profesionalmente, también para enfrentarse a la vida, es decir profesionales capaces de tomar decisiones bien fundamentadas que favorezcan cada uno de los entornos en los cuales se desenvuelven. La educación superior debe enfocarse en formar profesionales en un nuevo escenario, que implica pensar, trabajar y tomar decisiones en colaboración con otros

---

<sup>1</sup> [piedad.metaute@uniremington.edu.co](mailto:piedad.metaute@uniremington.edu.co)

<sup>2</sup> [giovanny.florez@uniremington.edu.co](mailto:giovanny.florez@uniremington.edu.co)

<sup>3</sup> [monica.cordoba@uniremington.edu.co](mailto:monica.cordoba@uniremington.edu.co)



profesionales, para resolver problemas con un máximo de ejecución eficiente [6], es por esto que los maestros universitarios deben innovar en sus estrategias didácticas e implementar todo tipo de metodologías que permitan que su proceso de enseñanza realmente apunte a formar los profesionales que el mundo requiere.

Los profesionales de hoy y del futuro [5] deben ser coherentes y sensibilizados a las principales problemáticas que presentan las ciudades. En este sentido las universidades deben vincular el proceso educativo del estudiante con su entorno a través de un proceso de aprendizaje activo, integrado y constructivo, para lo cual se hace necesario romper los paradigmas de la enseñanza tradicional y utilizar metodologías efectivas como el aprendizaje basado en problemas (ABP) el cual se enfoca en trabajar problemas del mundo real en dicho programa educativo, transformando la calidad de la enseñanza, y confiriéndole al estudiante la responsabilidad de su propio aprendizaje [5]. La metodología Aprendizaje Basado en Proyectos [8], tiene una característica especial y es resolver un problema de aplicación práctica. El proyecto está orientado a la acción, resolver problemas reales basándose desde la conceptualización teórica hasta la implementación práctica y con una segunda característica que lo hace más dinámico e interdisciplinario, bajo la implementación de trabajo en equipo.

La implementación de estrategias pedagógicas como Aprendizaje Basado en Proyectos (ABPr), que contribuyen a la dinamización de los procesos de formación, buscan la integración de los saberes, a través del desarrollo de un producto final que implica partir de una idea o necesidad, teniendo como parámetros fundamentales, la identificación de diferentes variables relacionadas con el ambiente donde se mueve tal necesidad u oportunidad, la planeación del proyecto involucrando procesos, actividades, recursos (talento humano, recursos físicos, tiempos), conduciendo al desarrollo de un producto o servicio que bajo parámetros investigativos sea soportado con fundamentos científicos, donde el trabajo colaborativo y la multidisciplinariedad, juegan un papel sumamente importante en la consolidación de dicha estrategia. Un estudio realizado sobre evaluación de estrategia ABPr, aplicada en ingeniería [10], plantea que dicha estrategia desarrolla en los estudiantes competencias para realizar la planeación de proyectos antes de aplicar su experimentación, las consultas de literatura para fundamentar la investigación del proyecto, la integración de los conocimientos obtenidos en clase, el análisis e interpretación de los datos de laboratorio, la comunicación efectiva de los resultados, así como el trabajo en equipo.

La estrategia pedagógica PICUR está fundamentada en la metodología ABPr Aprendizaje Basado en Proyectos, pretende que el maestro y los estudiantes desde el aula de clase diseñen e implementen proyectos integradores articulados con la empresa y el Estado, pero principalmente para beneficio de la sociedad nacional e internacional, integrando saberes y desarrollando un producto final diseñado a la medida de una necesidad planteada, por lo que la formación efectiva en ingeniería debe centrarse en implementar metodologías que permitan que el estudiante pueda adquirir los conocimientos específicos de su disciplina, pero al mismo tiempo pueda aplicarlos y generar desarrollos que apunten a necesidades puntuales.

Para complementar lo anterior, se presenta una estrategia didáctica exitosa con ingenieros en formación [11], utilizando la metodología de ABP Aprendizaje Basado en Problemas, donde se parte de un problema o un escenario de problematización en el cual docentes y estudiantes trabajan en conjunto para desarrollar la alternativa más efectiva, donde la ejecución de la estrategia se realiza en varios momentos, como son: Presentación del escenario o caso; Revisión del escenario o caso e identificación de necesidades de aprendizaje; Conformación de equipos de trabajo y planificación de la ruta de aprendizaje; Realización del trabajo de campo, documentación y solución del problema; Presentación de elaboraciones y resultados preliminares; Asesoría, acompañamiento y retroalimentación del tutor; Documentación y sistematización de la solución al problema; Socialización en plenaria ante el grupo de clase, es así como el ejercicio llevado a cabo como estrategia didáctica resulta eficaz y eficiente para plantear un modelo educativo que simule contextos profesionales en el que los ingenieros en formación puedan experimentar lo que será su futuro quehacer.

Las universidades hoy buscan innovar en los procesos formativos de los estudiantes de ingeniería, lo que lleva a los maestros a generar estrategias didácticas que permitan desarrollar las competencias que los futuros profesionales tendrán que demostrar en los entornos laborales y sociales, ya que existen diferentes metodologías que permiten acercar al estudiante a las múltiples situaciones problémicas que presenta el mundo real y mediante sus desarrollos contribuir a las posibles soluciones, algunas de las metodologías utilizadas para el desarrollo de competencias son: aprendizaje cooperativo, aprendizaje basado en problemas, aprendizaje colaborativo, aprendizaje basado en proyectos, entre otros [4], presentan una experiencia de ABP aprendizaje basado en problemas aplicada en la UPTC, estrategia que permite centrar el aprendizaje en el estudiante y este al mismo tiempo integre conocimientos para el desarrollo de competencias, la ejecución de la propuesta se lleva a cabo en los siguientes momentos: 1. Sensibilización (introducción al proceso donde se explican todas las características de que como se llevará a cabo), 2. Seguimiento a la solución del problema (anteproyecto, informe de avances, informe técnico de la solución e informe final), 3. Evaluación y Mecanismos (informes escritos y sustentación oral). La metodología propuesta se aplicó en la asignatura de Seminario de Investigación, de octavo semestre de ingeniería electromecánica, con equipos de dos integrantes.

Es así como la formación efectiva en ingeniería debe centrarse en implementar metodologías que permitan que el estudiante pueda adquirir los conocimientos específicos de su disciplina pero al mismo tiempo pueda aplicarlos y generar desarrollos para beneficio propio y de la sociedad en general, tal y como lo definen [3], los objetivos de toda

formación por competencias plantean (a) la articulación de los conocimientos conceptuales, procedimentales y actitudinales; (b) se apoyan en los rasgos de personalidad del sujeto para construir el aprendizaje y (c) exigen la acción reflexiva, ya que se aleja del comportamiento estandarizado.

Otro caso exitoso de ABPr se relaciona [12], con la importancia de hacer sentir al estudiante desde los primeros semestres de estudio como ingenieros, donde los proyectos estuvieran presentes desde el primer día, dónde el alumno sintiera constantemente todo lo que se deriva de trabajar por proyectos: la definición, la venta, los tiempos, los costes, las pruebas, las reuniones, el seguimiento, etc. Para llevar a cabo la experiencia se diseñó un proyecto integrador en cada curso involucrando varias asignaturas. El proyecto consistió en el análisis de necesidades, diseño y desarrollo de un software compuesto de una aplicación de escritorio, una base de datos y una aplicación Web, para dar respuesta a una necesidad real de una empresa externa.

Los proyectos integradores como estrategia didáctica e innovadora, en los procesos de enseñanza-aprendizaje con los estudiantes de ingeniería pretenden articular la teoría y la práctica, donde [13] es importante el desarrollo de proyectos que integren diferentes áreas del conocimiento como estrategia formativa, donde se unifiquen criterios que permitan el desarrollo de proyectos que integren asignaturas específicas y transversales por semestre a través de un trabajo colaborativo, donde se evidencie resultados, a través de solución a situaciones problemáticas reales.

### 3. MÉTODO

Para el desarrollo de la investigación se revisaron fuentes científicas como trabajos de investigación, artículos, libros, revistas y experiencias significativas publicadas en medios científicos, siendo la base para la fundamentación de dicha investigación. De igual forma se realizó análisis sobre las competencias que debe tener el ingeniero del siglo XXI, en total diez, las cuales fueron resultado de la investigación “Estrategia Pedagógica para formadores y estudiantes del siglo XXI: Un aporte a la socio-afectividad y autogestión del conocimiento en los programas de ingeniería de Uniremington, acorde con las dinámicas cambiantes del mundo globalizado”, que al cruzarse con las competencias de cada una de las asignaturas de la ingeniería y las competencias evaluadas por el estado en pruebas Saber Pro para Ingeniería de Sistemas, de acuerdo al perfil que se espera de dichos profesionales, permitió crear matriz de competencias, siendo la base para el diseño de la estrategia pedagógica en mención, PICUR (Proyecto Integrador de la Corporación Universitaria Remington). Donde el trabajo de campo a través de la recolección de datos aplicados a egresados de Ingeniería de Sistemas de la Corporación Universitaria Remington en lo relacionado con el desarrollo de competencias permitió contextualizar el perfil esperado para este tipo de profesional (Figura 1).



Figura 1. Proceso Metodológico

### 4. RESULTADOS

De acuerdo a conclusiones generadas a través de la investigación en mención [9], el ingeniero del siglo XXI, deberá formarse integralmente a nivel personal y profesional, con capacidad de análisis y síntesis, con fundamentación teórico-práctica en su disciplina e integración con otras disciplinas, optimización de recursos, alto compromiso social y ambiental, comunicación eficiente en su idioma nativo y otros, análisis de información para la toma de decisiones, generador de ambientes y medios que le permitan actualizar y construir conocimiento, siendo autocrítico y crítico para discernir claramente sobre situaciones que requieran la toma de decisiones importantes, trabajo en equipo que integre la individualidad como aporte a metas comunes, donde el profesional en ingeniería tenga un compromiso que desde la ética de su disciplina esté en capacidad de formular y gestionar proyectos de calidad altamente innovadores y creativos que favorezcan al medio ambiente y a la sociedad.

Plantean para el diseño de estrategia pedagógica para formadores y estudiantes del siglo XXI [9], diez pilares fundamentales que se deberán convertir en competencias como son: la apropiación del aprendizaje basado en

problemas y proyectos reales; la generación de ideas innovadoras que, aplicadas a necesidades reales, permitan el desarrollo de la creatividad, bajo herramientas propias de la o las ingenierías; la interdisciplinariedad de diferentes asignaturas e ingenierías; la formación de profesionales con pensamiento crítico; la autogestión, autodidacta, automotivación, autocrítico, con capacidad de revisar sus propios logros y de proyectarse hacia metas personales y profesionales; la relación directa y continua entre fundamentación teórica y laboratorio; la interacción directa y continua entre academia y empresa, como factor indispensable para minimizar brechas entre la teoría y la práctica; el desarrollo de competencias investigativas; el fortalecimiento de relaciones interpersonales, a través del trabajo en equipo (colaborativo y cooperativo); la creación, desarrollo y ejecución de proyectos personales, familiares y empresariales, de acuerdo a necesidades y oportunidades.

Es así como teniendo en cuenta los resultados anteriores, se diseña estrategia pedagógica para formadores y estudiantes del siglo XXI. PICUR (Proyecto Integrador de la Corporación Universitaria Remington), que permite la integralidad de los diferentes procesos de formación en el saber, saber hacer, saber ser, saber convivir, para el logro de competencias transversales, específicas y multidisciplinares que, desde la automotivación, innovación, investigación y creatividad, permitan dar soluciones a situaciones reales en diversos contextos.

#### **4.1 Diseño de estrategia pedagógica PICUR**

La estrategia pedagógica PICUR se diseña teniendo en cuenta los siguientes aportes:

1. Resultados de desarrollo de investigación, “Estrategia Pedagógica para formadores y estudiantes del siglo XXI: Un aporte a la socio-afectividad y autogestión del conocimiento en los programas de ingeniería de Uniremington, acorde con las dinámicas cambiantes del mundo globalizado”, la cual generó participación en simposios con publicación en memorias, (“Estrategias pedagógicas actuales y su incidencia en el desarrollo de competencias en los estudiantes y egresados de ingeniería de la Uniremington”, así como “La dinamización de las estrategias pedagógicas actuales: una necesidad aplicable a los procesos de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería del siglo XXI”) y artículo denominado “Diagnóstico sobre el desarrollo de competencias en los ingenieros de Uniremington: Un aporte para la construcción de estrategia pedagógica acorde con los retos de la ingeniería para el siglo XXI”.
2. Reflexión sobre las competencias actuales de los programas de Ingeniería de Uniremington, así como el perfil que se espera de dichos profesionales de acuerdo a evaluaciones del Ministerio de Educación y las necesidades del ingeniero del siglo XXI, lo cual lleva a contextualizar la estrategia pedagógica en mención PICUR, dentro del currículo de la facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, teniendo en cuenta la estructuración del diseño curricular previamente establecido, la incorporación de dicha estrategia como parte del currículo, donde el desarrollo de competencias, su seguimiento y los respectivos procesos de retroalimentación, buscan establecer el contexto sobre el cual girará PICUR.

Por lo que el proyecto integrador pretende la minimización de las brechas existentes entre la teoría y la práctica, buscando un verdadero logro de competencias que se deberá reflejar en la dinamización del proceso de formación del profesional, donde exista sincronización entre academia-sector productivo, todo ello bajo las necesidades reales del contexto, tanto cercano como lejano, es así como fue fundamental definir un mapa de competencias, cuyos insumos se tomaron del documento maestro de la respectiva ingeniería, así como de las competencias evaluadas en pruebas externas del Estado y enriquecidas con las competencias del ingeniero del siglo XXI, resultado de la investigación en mención.

#### **4.2 Algunas competencias, según pruebas de Estado para Ingeniería**

Las competencias más relevantes para el apoyo al proyecto son:

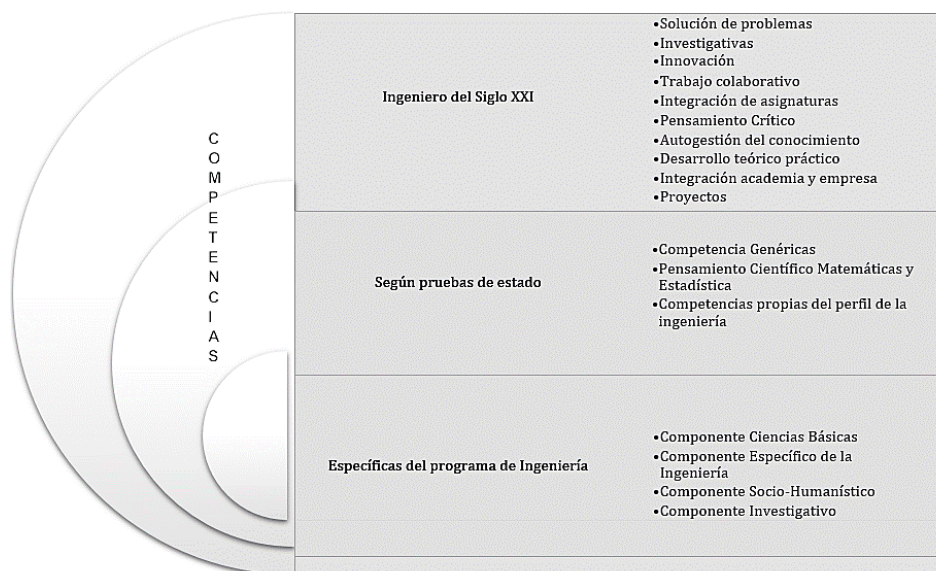
- Desarrolla el razonamiento cuantitativo, en la solución de problemas aplicando principios matemáticos.
- Identifica competencias ciudadanas para saber convivir, aportando de manera constructiva en la sociedad.
- Tiene la capacidad de comunicarse de manera escrita de forma clara y coherente.
- Tiene la capacidad de realizar críticas a lecturas, evaluando lo que el escritor está diciendo y formándose sus propias opiniones sobre lo que lee.
- Posee competencias comunicativas en el idioma inglés en relación a escritura, lectura, escucha y habla.
- Desarrolla el pensamiento científico, en relación a formulación de hipótesis y su capacidad para demostrar lo planteado.
- Propone estrategias para la resolución de problemas del contexto relacionadas con la aplicación de la ingeniería.
- Tiene capacidad para búsqueda, representación e interpretación de información con fundamentación matemática, estadística y científica.
- Analiza críticamente resultados, a partir de los cuales deriva conclusiones.
- Comprende, analiza y propone modelos que permitan describir, explicar y predecir fenómenos o sistemas.
- Establece soluciones a situaciones problemáticas, relacionadas con sistemas informáticos.
- Propone soluciones relacionadas con aspectos técnicos, económicos, sociales, éticos y ambientales, basadas en requerimientos personales y empresariales.
- Aplica la fundamentación matemática, para la solución de problemas relacionados con aspectos de ingeniería.

### 4.3 Competencias del Ingeniero del siglo XXI, según resultado de investigación

- Se apropia del conocimiento aplicado, a través de la solución de problemas del contexto y/o la generación de oportunidades.
- Desarrolla trabajos de investigación que conduzcan a la consolidación de nuevas herramientas (modelos, estrategias, metodologías), que puedan ser aplicadas como soluciones o nuevas alternativas de impacto científico, ambiental y social.
- Genera de ideas innovadoras, aplicadas en necesidades reales, permitan el despliegue de la creatividad, bajo herramientas propias de la o las ingenierías.
- Genera espacios reflexivos, a través del trabajo colaborativo y cooperativo, donde los aportes individuales y colectivos, se consoliden en proyectos viables, fortaleciendo la comunicación, la inteligencia emocional, los fundamentos éticos y el respeto por las ideas del otro.
- Integra varias asignaturas y/o áreas del saber, para la resolución de problemas o construcción de nuevo conocimiento.
- Desarrolla el pensamiento crítico, con suficiente claridad y precisión en sus ideas, que con evidencias teórico-prácticas y gestión de la información, puedan tomar decisiones pertinentes bajo fundamentos de equidad.
- Tiene capacidad de autogestión, autodidacta, automotivación, auto criticidad, con capacidad de revisar los propios logros y de proyectarse hacia metas personales y profesionales.
- Aplicación directa y continua entre fundamentación teórica y laboratorio, como factor obligatorio para la interpretación y aplicación de todo concepto teórico en práctico.
- Capacidad para interactuar directa y continua entre academia y empresa, como factor indispensable para la minimización de brechas entre la teoría y la práctica, donde se planteen soluciones argumentadas, acorde a retos empresariales.
- Desarrolla y ejecuta proyectos personales, familiares y empresariales, autosustentables, con impacto ecológico y ambiental, innovadores, con enfoque social, que consolidados permitan la generación de aportes económicos, sociales y ambientales, dentro de contextos locales y/o globales.

### 4.4 Competencias propias del programa

Para el análisis de dichas competencias, éstas se agruparon en cuatro componentes (Ciencias Básicas, Específicas de la Ingeniería, Socio-Humanísticas e Investigativas), donde se tuvo en cuenta el aporte que genera cada asignatura del pensum académico de la ingeniería. A continuación, se presenta un resumen basado en el mapa de competencias planteadas, donde se puede apreciar el enfoque de las competencias en mención (ver Figura 2).



**Figura 2.** Competencias a desarrollar en el Ingeniero Uniremington

1. Contexto para desarrollo de PICUR, dicha estrategia podrá ser aplicada a cualquier pregrado, no necesariamente de ingeniería, ya sea presencial o virtual e ir cambiando su denominación de acuerdo a la disciplina del pregrado (PISCUR, PIICUR, PICCUR, PIDCUR, PIACUR, entre otros) (Ver Figura 3).

Es importante comprender la dimensión del proyecto, donde en sus inicios se aplicará prototipo para la carrera Ingeniería de Sistemas de Uniremington, especialmente en estudiantes que a través de sus asignaturas hayan cursado los créditos relacionados con los primeros tres semestres del pregrado o en su defecto asignaturas centrales que permitan recoger competencias que fundamenten el desarrollo del proyecto, con réplica en semestres más avanzados (tercer semestre, sexto semestre y último semestre, en total tres proyectos durante todo el pregrado) (Ver Figura 4).

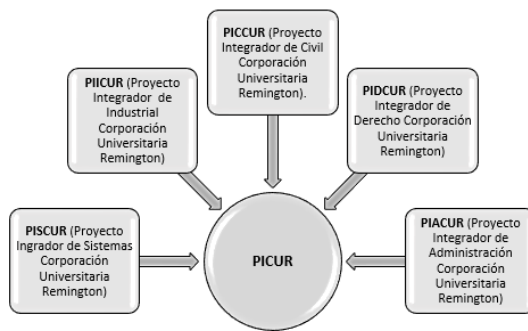


Figura 3. Contexto para el desarrollo de PICUR

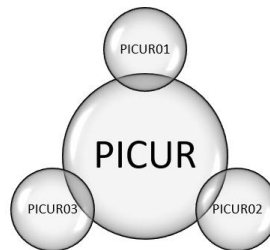


Figura 4. Dimensión de PICUR

2. Estructura de PICUR, en relación a la conformación del proyecto integrador, ésta posee cuatro componentes como son: Problematicación y/o Prospectiva, Investigación y Modelación, Integración e Innovación y el último llamado Solución. Es así como cada componente o parte, se desarrollará por etapas durante el semestre, donde a lo largo del pregrado cada estudiante, deberá participar en tres PICUR (PICUR01 para abordar competencias de los tres primeros semestres, PICUR02 competencias de los seis primeros semestres y PICUR03 competencias de todos los semestres que componen dicho pregrado), por lo tanto, PICUR02 deberá tener mayor grado de profundidad que el 01 y menor grado de profundidad que el 03. Los cuatro componentes de PICUR, se enmarcan en:

- *Problematicación y/o Prospectiva*: definición de situaciones problemáticas, apoyadas en una pregunta problematizadora o hipótesis, que busque dar solución a dicha necesidad, pero de igual forma se puede enfocar hacia la generación de oportunidades orientadas a desarrollos con proyecciones a futuro.
- *Investigación y Modelamiento*: búsqueda del conocimiento y su aplicación, con el apoyo de herramientas científicas y metodológicas, que faciliten la comprensión que se puede obtener mediante la propia disciplina de la carrera.
- *Integración e Innovación*: generación de ideas innovadoras que, aplicadas a necesidades reales, permitan el despliegue de la creatividad, bajo herramientas propias de la o las ingenierías, donde a través de la Integración de varias asignaturas y/o áreas del saber, se construya nuevo conocimiento.
- *Solución*: desarrollo y ejecución de proyectos personales, familiares y empresariales, autosustentables, con impacto ecológico y ambiental, innovadores, con enfoque social, que consolidados permitan la generación de aportes económicos, sociales y ambientales, dentro de contextos locales y/o globales. En tal sentido la solución deberá arrojar dos resultados representado en prototipo funcional y producción científica. (Ver Figura 5).



Figura 5. Componentes de PICUR

3. Desarrollo académico de los componentes PICUR, la conformación de los diferentes proyectos que partirán de una idea para desarrollar, deberán contar con sustentación teórica y científica, siendo éstas el soporte para la consolidación de un producto, acorde al perfil de la ingeniería (Sistemas, Informática, Industrial, Civil, entre otras), es así como cada componente o etapa del proyecto integrador contará con un tiempo estimado para su desarrollo, partiendo de una idea que al ser evolucionada se convertirá en propuesta fundamentada de fuentes científicas, para posteriormente buscar la integración de varias disciplinas, modelos, metodologías que se consoliden en dos tipos de resultados o productos, el primero con características técnicas donde se desarrolle un prototipo funcional, presentado a pares y/o empresarios en evento público y otro académico, el segundo un producto publicable en un medio de divulgación como periódico, revista, evento, entre otros (Ver Figura 6).

1. Problemática y/o Prospectiva	2. Investigación y Modelación
<b>Idea:</b> Título Contexto (donde se presenta o presentará la situación) Planteamiento del problema o hipótesis Justificación Objetivos (general y específicos) Alcance	<b>Propuesta:</b> Cronograma de actividades Estado del arte o referente teórico Metodología (marco metodológico) Resultados esperados Referencias Bibliográficas (APA) Diligenciamiento de formato (Presentación de proyecto)
3. Integración e Innovación	4. Solución
<b>Prototipo Funcional:</b> -Selección de herramientas, modelos, metodologías -Aplicación de herramientas, modelos, metodologías -Integración de saberes -Desarrollo (Prototipo Funcional) -Folleto Conclusiones	<b>Productos:</b> > Resumen del proyecto Título en español Autores Resumen Introducción. Objetivo general. Métodos. Resultados y discusión. Conclusión. Palabras clave. > Prototipo Funcional

Figura 6. Desarrollo de Componentes PICUR

4. Proceso de evaluación PICUR, para fortalecer el desarrollo de la estrategia pedagógica, se plantean cuatro procesos (asesorías, entregables, socialización, retroalimentación), que buscan ajustar y mejorar dicha herramienta. El acompañamiento de expertos metodológicos y temáticos, a través de asesorías buscan la consolidación del proyecto, donde de igual forma existirá entregas parciales que generará automotivación para el cumplimiento de metas, así como la socialización de resultados ante pares, academia, industria y demás espacios que aporten a los diferentes proyectos, donde a través de mecanismos de retroalimentación se puedan incorporar “buenas prácticas” a la estrategia PICUR (Ver Figura 7).

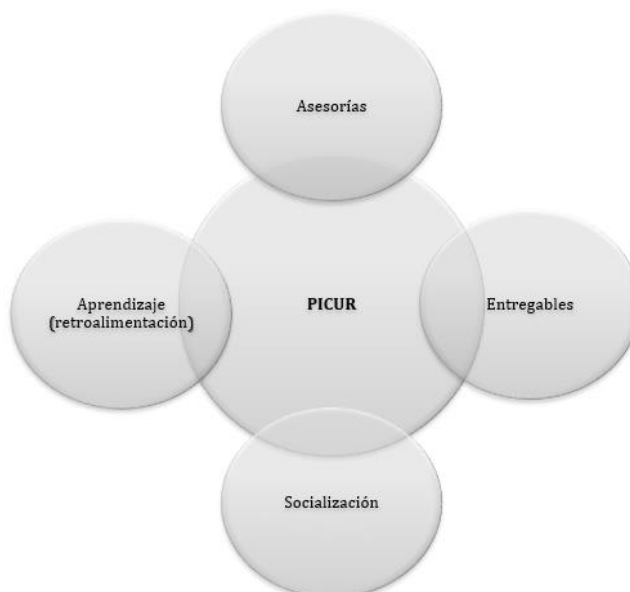
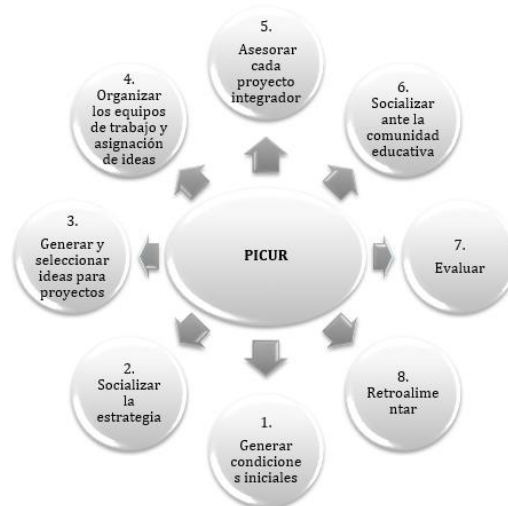


Figura 7. Proceso de evaluación PICUR

5. Ejecución del Proyecto Integrador (PICUR), para la puesta en marcha de la estrategia pedagógica, se plantean ocho pasos (Ver Figura 8).



**Figura 8.** Proceso de ejecución PICUR

Con la ejecución de PICUR, se busca transversalizar el currículo, generando impacto personal, profesional, empresarial, donde para su desarrollo se deberá generar las condiciones iniciales para su aplicación, integrando talento humano representado en asesores tanto metodológicos como disciplinares, plan de trabajo, recursos financieros y el apoyo de directivos de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de Uniremington. Dentro de los enfoques del proyecto integrador, se hace indispensable el trabajo colaborativo y cooperativo, por lo que la socialización de la estrategia a docentes, estudiantes, directivos y representantes del sector productivo, juega un papel importante, ya que permite la consolidación del equipo de trabajo para su posterior desarrollo, siendo necesario realizar dicha socialización al inicio de cada semestre.

En relación al insumo inicial para la puesta en marcha del proyecto integrador, se debe partir de la generación de ideas, necesidades u oportunidades que requieran ser planteadas y solucionadas, aplicando para ello fundamentación teórica, pero con resultados prácticos y científicos, es así como se hace necesario la realización de convocatoria sobre necesidades u oportunidades que requieran ser fundamentadas, analizadas, desarrolladas y ejecutadas, para lo cual se crea un banco de ideas, al cual pueden aportar personal directivo, docentes, estudiantes, sector productivo y demás personas interesadas. Las ideas serán clasificadas por un “Comité de Selección”, de acuerdo a las competencias que se deseen desarrollar a través de PICUR (Ver Figura 9).

PREGUNTAS    RESPUESTAS    12

---

### Banco de Ideas (PICUR) Proyecto Integrador Corporación Universitaria Remington

Objetivo: Generar banco de ideas, orientado a la solución de problemas o generación de oportunidades donde se aplique la innovación y la creatividad, aplicadas a un proyecto de desarrollo técnico con fundamentación científica, para los programas de Ingeniería de Sistemas y Tecnología en Desarrollo de Software.

Nota: tener presente que el hecho de diligenciar el formulario y mencionar la idea, no generará derechos de autor, ya que quien desarrolle dicha idea puede ser cualquier estudiante. Si está de acuerdo, favor diligenciar el formulario, de lo contrario se recomienda salirse sin diligenciarlo.

Agradecemos su aporte...

1. Defina la idea (solución de problemas o generación de oportunidades apoyadas desde las competencias de diferentes asignaturas de ingeniería de Sistemas). La idea planteada debe tener: nombre de la idea, descripción del problema u oportunidad. \*

Texto de respuesta larga

---

2. Asignaturas que le aportan al desarrollo de la idea. \*

Texto de respuesta larga

---

3. Resultados que se esperan con el desarrollo de la idea \*

Texto de respuesta larga

---

4. Idea planteada por: \*

**Figura 9.** Formulario Banco de Ideas

En ese mismo sentido, resulta necesario la organización de equipos de trabajo y asignación de ideas (mínimo dos integrantes, máximo tres), donde las ideas podrán tomarse del banco previamente publicado o por iniciativa propia del o de los estudiantes, sometiéndose éstas a evaluación por el “comité de selección”, quienes asesorarán su validez, de acuerdo al proyecto integrador (PICUR01, PICUR02, PICUR03) y a las competencias que se deseen desarrollar, haciéndose necesario la selección y el análisis de ideas a incorporar a cada proyecto.

El éxito del proyecto dependerá en gran medida del apoyo que reciba, en lo que tiene que ver con asesorías tanto metodológicas como específicas de acuerdo a la disciplina del proyecto, fortaleciendo su evolución, agilizando su desarrollo y puntualizando resultados, desde fundamentación teórico-científica, consolidándose en productos funcionales, que puedan ser puestos a disposición de acuerdo a su fin, donde los espacios de socialización, se convierten en factores motivantes, de participación y reconocimiento, siendo fuente de inspiración en otros estudiantes, quienes deberán proponerse metas que superen los resultados observados, por lo tanto se plantea la presentación de prototipos en ferias internas y/o externas, así como la difusión de resúmenes producto de investigación en revistas internas y/o externas a la universidad, obteniendo así de PICUR dos tipos de producto, uno técnico y otro científico.

Es importante para todo proyecto la aplicación de procesos evaluativos, buscando con ello la realización de ajustes, para lo cual se propone la aplicación de rúbricas que se encuentran directamente relacionadas con las competencias a desarrollar, donde para PICUR, corresponde a las competencias propias del programa, las competencias evaluadas en pruebas de Estado, además de las competencias que deberá desarrollar un ingeniero del siglo XXI, donde todo lo anterior bajo la dirección de equipos multidisciplinarios busca generar reflexiones que conlleven a realizar procesos de retroalimentación que en definitiva lo que pretende es madurar procesos viables que puedan ser ejecutados en contextos diferentes a la academia y que puedan ser puestos a disposición de la sociedad.

## **5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

La formación en ingeniería, para el siglo XXI, deberá mirarse desde otras perspectivas, donde el docente juegue un papel importante y para ello deberá tener formación, no sólo en su disciplina, sino en componentes pedagógicos que le den herramientas para establecer bases de formación en los estudiantes, para forjar nuevos profesionales que aporten hacia soluciones dinámicas de una sociedad cambiante y globalizada, donde [2], un docente sin formación pedagógica y que forme en ingeniería se centra en intereses netamente técnicos, minimizando la interacción de conocer contextos e identificar problemas reales, modelar situaciones aplicables mediante el uso de la Ingeniería, esto indica que existe una ausencia de discusión y de reflexión crítica sobre las tendencias educativas y de formación de los Ingenieros.

En ese mismo sentido [1] “los docentes expertos en su disciplina, apoyados por especialistas en educación y didáctica, deberían tomar una posición y definir las estrategias de enseñanza más adecuadas en las carreras de ingeniería. Desde el punto de vista de los autores, tener un único estilo, ya sea por ajuste del docente al alumno o del alumno al docente, es limitado. Es necesario que los estudiantes estén formados para disponer de más de un estilo, aunque quizás uno de ellos prevalezca o conforme una zona de mayor confort sobre el otro.”

Es así como la academia, deberá buscar estrategias pedagógicas con lineamientos claros, que sirvan de apoyo, tanto a docentes con cualificación en pedagogía como aquellos que no la tienen, buscando integrar las diversas competencias que giran alrededor de cada asignatura, donde en definitiva la intencionalidad deberá enfocarse hacia la integración de los diferentes componentes que buscan la formación del profesional en Ingeniería, donde [7] se debe lograr un componente más equilibrado entre práctica y teoría, ya que este aspecto se constituye en una de las principales debilidades, donde se debe volver la mirada al trabajo investigativo, en la perspectiva de la formación de un profesional con pensamiento flexible, dispuesto al cambio y comprometido a la generación de conocimiento en el área.

## **6. CONCLUSIONES**

La estrategia pedagógica PICUR además de ser una metodología de aprendizaje dinámica y práctica que permite al estudiante enfrentarse con problemas reales y presentar soluciones efectivas, también puede ser un mecanismo de diagnóstico que permita a la institución detectar aquellas oportunidades de mejora que impiden el logro de competencias de los estudiantes de ingeniería y abordar acciones inmediatas que conlleven a un proceso de formación exitoso.

Para la aplicación de la estrategia pedagógica PICUR se determina claramente: las competencias que debe mostrar el estudiante, los actores que intervienen, el proceso a desarrollar, los mecanismos de control, seguimiento y evaluación y finalmente los productos a entregar, siendo estos últimos no solo intencionados para demostrar aprendizaje a nivel técnico, también evidenciar la generación de nuevo conocimiento.

PICUR no se limita a un solo proyecto durante la carrera, por el contrario, propone tres proyectos (PICUR01, PICUR02, PICUR03), los cuales están diseñados estratégicamente para integrar conocimiento y demostrar logro de competencias, entregando a la sociedad soluciones que realmente satisfagan necesidades reales.

Por lo tanto, PICUR se plantea como una herramienta pedagógica que puede ser aplicada, no sólo a ingeniería, sino a cualquier pregrado, donde se busca disminuir la brecha existente entre la teoría y la práctica, la academia y la empresa, consolidándose en una estrategia que permite visibilizar las capacidades de los estudiantes en el desarrollo de proyectos reales con posibilidades de expansión de acuerdo a sus propios intereses.



## REFERENCIAS

- [1] Ventura, A. et al. (2014). Estilos de aprendizaje y enseñanza en ingeniería: Una propuesta de educación adaptativa para primer año. *Revista Educación en Ingeniería* 9(18), 178-189.
- [2] Bolaños, F. (2017). Dificultades en la Formación de Ingenieros. Universidad Cooperativa de Colombia
- [3] Dalfaro, N. et al. (2018). Hacia la integración efectiva de un modelo por competencias en la carrera de ingeniería de la Facultad Regional Resistencia de la Universidad Tecnológica Nacional: Entre la formación inicial y la formación docente. *Revista Educación en Ingeniería* 25(58), 796-816.
- [4] Fernández, F. & Duarte, J. (2013). El aprendizaje basado en problemas como estrategia para el desarrollo de competencias específicas en estudiantes de ingeniería. *Formación universitaria* 6(5), 29-38.
- [5] Frontado, Y., Guaimaro, Y. & Flores, M. (2018). Metodología ABP como Herramienta Educativa Universitaria para Crear Ciudades Sustentables. *Tekhné* 21(1), 99-107.
- [6] Irigoyen, J., Jiménez, M. & Acuña, K. (2011). Competencias y educación superior. *Revista mexicana de investigación educativa* 16(48), 243-266.
- [7] Jaramillo, O. (2015). Pertinencia del perfil de los profesionales de la información con las demandas del mercado laboral. *Revista Interamericana de Bibliotecología* 38(2), 111-120.
- [8] Martí, J. et al. (2010). Aprendizaje basado en proyectos. *Revista Universidad EAFIT* 46(158), 11-21.
- [9] Metaute, P. & Flórez, G. (2017). Diagnóstico sobre el desarrollo de competencias en los ingenieros de Uniremington: un aporte para la construcción de estrategia pedagógica, acorde a los retos de la ingeniería para el siglo XXI. *Revista Actas de Ingeniería* 3, 260-268.
- [10] Rodríguez, E., Vargas, E. & Luna, J. (2010). Evaluación de la estrategia "aprendizaje basado en proyectos". *Educación y educadores* 13(1), 13-25.
- [11] Vega, C. (2013). Experiencia formativa ABP llevada al aula: estrategia educativa efectiva para el aprendizaje significativo y competente de estudiantes de primer año de ingeniería. In: WEEF 2013.
- [12] Flores, V. et al. (2013). Project Based Engineering School: Una escuela conectada con un mundo profesional sostenible. In: X Jornadas Internacionales de Innovación Universitaria.
- [13] Parra, J. (2013). Proyecto Integrador como estrategia formativa para el fortalecimiento de competencias específicas y transversales en la Facultad de ingeniería. In: WEEF 2013.

# Descripción de una metodología de evaluación por competencias en programas de Ingeniería: caso aplicado a la Corporación Universitaria Americana – Sede Medellín

David A. García A.<sup>1</sup>

César F. Henao V.<sup>2</sup>

Gustavo A. Araque G.<sup>3</sup>

Corporación Universitaria Americana  
Medellín – Antioquia

Los procesos de administración curricular en programas de Ingeniería incluyen políticas encaminadas al desarrollo de niveles de competencia en sus estudiantes para que desarrollen la capacidad de resolver necesidades propias del contexto. En este sentido, y considerando como fundamental la evaluación de este tipo de políticas, el presente capítulo describe una estrategia metodológica utilizada para la evaluación del nivel de avance de las competencias profesionales en la estrategia de aprendizaje basado en proyectos de la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Americana. Para el desarrollo de la estrategia, se realizó una triangulación de información con enfoque mixto mediante una matriz de evaluación alimentada con información de docentes, desempeño de estudiantes en la elaboración de su proyecto y estándares de competencias profesionales propuestos por la acreditadora internacional ABET. Como resultado, se obtiene la construcción de un polígono relacional normalizado de competencias que, articulado al desarrollo de una estrategia de aprendizaje basada en proyectos, posibilita una mejor trazabilidad del recorrido del estudiante por el plan de estudios. Como conclusión, se identifican aspectos sensibles del desarrollo metodológico, futuras líneas de trabajo en el marco del cálculo de índices de efectividad y se plantea la importancia de utilizar este tipo de metodologías como estrategias de diagnóstico de la relación entre los principios teleológicos de las Instituciones de Educación Superior y el quehacer docente.

## 1. INTRODUCCIÓN

Diversas son las dinámicas e intereses institucionales que se corresponden en mayor o menor medida con la intencionalidad de cualificación del perfil de egreso de los estudiantes de las Instituciones de Educación Superior (IES), perfil plasmado en los insumos, procesos, metas y productos propuestos por los lineamientos curriculares para los diversos programas formativos y desde sus distintas dimensiones y perspectivas. La ineluctable ambigüedad entre la intencionalidad institucional (explícita o implícita) y los fines educativos para satisfacer las necesidades sociales, presenta la necesidad de orientar el aprendizaje hacia indicadores en apariencia medibles, de conocimiento mundial y que sirven de referencia para clasificar las Instituciones de Educación Superior, según la calidad del profesional o la profesional que egresa de ellas. Tales necesidades pueden verse en la creación de estrategias de evaluación externas gubernamentales que pretenden definir si el egresado es competente o no, y hacen que estos indicadores estén denominados en términos de competencias, los indicadores han recibido diversas acepciones según el contexto desde el cual se les mire y están determinando las rutas metodológicas a seguir en las estrategias de enseñanza-aprendizaje.

En el presente escrito, se ponen de manifiesto los resultados obtenidos de una investigación desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Americana, en la cual, se construyó una metodología de evaluación por competencias basada en el modelo propuesto por la acreditadora internacional ABET [1]. La metodología en cuestión, fue desarrollada en el marco del desarrollo de proyectos integradores como una estrategia de aprendizaje basado en proyectos que articula los procesos de docencia, extensión e investigación formativa con miras a definir y fortalecer el perfil de egreso para la competitividad en la institución. En la revisión de antecedentes se identificaron estrategias encaminadas al empoderamiento y vinculación de lo tratado en las asignaturas de los programas con situaciones problema del contexto, mediante las cuales se “integren los conceptos con módulos, y se utilicen actividades experienciales prácticas” [1] [2].

Específicamente, en la búsqueda de literatura, se identificó que para el caso de programas de Ingeniería, una estrategia útil es el Aprendizaje Basado en Competencias (CBL por sus siglas en inglés), éste puede ser definido como “una aproximación pedagógica que se enfoca en el dominio de resultados medibles obtenidos por los estudiantes” [3], en este orden de ideas, se identifica que el desarrollo de las competencias se evidencian en el desempeño para objetivos explícitos y medibles; el CBL, posibilita la implementación de estrategias pedagógicas adicionales que potencian el aprendizaje y los resultados obtenidos por parte de los estudiantes, se incluyen, el Aprendizaje Basado en Proyectos [4], Aprendizaje Basado en Problemas [5], Aprendizaje Experiencial [6], Simulaciones/realidad virtual [7], Aprendizaje Basado en Equipos [8] y Andamiaje o Scaffolding [9]. Ahondando en el Aprendizaje Basado en Proyectos, es menester identificar que para una correcta implementación de éste se considera fundamental la concepción de un currículo basado en la racionalidad práctica, más que en la técnica [10], esta aseveración es apoyada por precursores de la estrategia de aprendizaje.

---

<sup>1</sup> [dagarcia@coruniamericana.edu.co](mailto:dagarcia@coruniamericana.edu.co)

<sup>2</sup> [chenao@coruniamericana.edu.co](mailto:chenao@coruniamericana.edu.co)

<sup>3</sup> [garaque@americana.edu.co](mailto:garaque@americana.edu.co)

En primer lugar, Jean Piaget y el constructivismo planteando la importancia de que los estudiantes construyan su conocimiento a través de la experiencia, por ejemplo a través del aprendizaje por descubrimiento [11], es así como “la práctica de teorías constructivistas posibilita la creación de un entorno que es apto para el aprendizaje basado en proyectos” [12], en segundo lugar, Lev Vygostsky desde el reconocimiento de los aspectos sociales considerando el aprendizaje por experiencia a través de la interacción social e interpersonal y escalando su teoría hacia la Zona de Desarrollo Próximo (ZDP) y su concepto de andamiaje [13]. Finalmente, John Dewey, quien es considerado padre del Aprendizaje Basado en Proyectos, consideró que los estudiantes deben tomar parte en su propio aprendizaje para que sea efectivo, planteaba que las metodologías eficientes en el aprendizaje “les dan a los alumnos algo que hacer, no algo que aprender; y si el hacer es de tal naturaleza que demanda el pensar o la toma de conciencia de las conexiones; el aprendizaje es un resultado natural” [14].

Las estrategias de aprendizaje basadas en proyectos, han sido relevantes en la última época. Se citan estudios previos desarrollados por Ingenieros sin Fronteras [15] [16], quienes plantean una estrategia de aprendizaje basado en proyectos encaminada al desarrollo de competencias genéricas y específicas en ingeniería. Más recientemente, se referencian estudios de evaluación [17], donde se analizan aspectos relacionados con la forma en que se pueden ser evaluados y medidos aspectos transdisciplinarios mediante un modelo que identifica niveles de transferencia de conocimiento y la influencia de los distintos saberes en proyectos de investigación científicos. Igualmente, se resalta un estudio de evaluación de competencias para proyectos finales de carrera [18], donde se identifican niveles de avance en competencias genéricas y específicas contrastándolas desde perspectivas de autoevaluación, heteroevaluación y coevaluación.

Como insumos para el desarrollo de la metodología, se relacionaron datos provenientes del trabajo en el aula para las asignaturas por semestre, relación del desarrollo de los proyectos con el desempeño en las asignaturas, definición de aporte de las asignaturas a la construcción y consolidación de competencias profesionales y nivel de avance del producto del desarrollo del proyecto desde una perspectiva de pensamiento crítico, creativo y colaborativo.

Mediante una matriz de evaluación, se generaron los índices de evaluación con la participación de los docentes de la facultad, el cual permitió construir un polígono relacional de competencias para identificar si el estudiante ha avanzado en las competencias a evaluar desde la perspectiva del desarrollo de su proyecto integrador, de tal forma que se pudieron generar acciones de resignificación de la interacción entre docentes, estudiantes y administrativos.

De la implementación de la metodología de evaluación, se desprende la identificación de variables inherentes al proceso que inicialmente no fueron consideradas y que influyen significativamente en las mediciones propuestas para el complejo entorno áulico. Como conclusiones, se presentan los aspectos más relevantes de la aplicación de la metodología, sus implicaciones, futuras implementaciones y estrategias de adaptación al sistema educativo. Igualmente, se identifica que la metodología ofrece una oportunidad para reflexionar acerca de la influencia del componente teleológico de las Instituciones de Educación Superior en el quehacer docente, el cual a su vez trasciende a los componentes de las características de egreso de los estudiantes.

## **2. MÉTODO**

### **2.1 Descripción del contexto y de los participantes**

La Corporación Universitaria Americana es una Institución Universitaria de carácter privado con sede en la ciudad de Medellín, Colombia. Tiene más de diez mil estudiantes que para el caso de ingeniería, tiene más de trescientos, repartidos en los programas de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Industrial. El modelo de pedagógico de la universidad, es de Formación por Procesos Autorregulativos [19] y propende por el fortalecimiento de la metacognición en sus estudiantes de Ingeniería a partir de un Aprendizaje Basado en Proyectos (ABPr).

El programa de Ingeniería de Sistemas tiene una duración curricular de nueve semestres, mientras el de Ingeniería Industrial, diez. El ABPr se lleva a cabo desde el primer semestre y hasta el séptimo semestre para Ingeniería de Sistemas y de primer a octavo semestre para Ingeniería Industrial. El mecanismo para llevar a cabo el ABPr es mediante la Concepción, Diseño, Implementación y Operatividad de Proyectos Integradores que, ideados por los equipos conformados por estudiantes de primer semestre, se irán fortaleciendo semestre a semestre hasta lograr algún producto que responde a la necesidad o problema planteada al inicio del programa formativo.

La Facultad de Ingeniería de la universidad, inició la implementación de proyectos integradores desde el año 2014 y actualmente cuenta con 277 estudiantes distribuidos en 121 proyectos. Cada proyecto integrador, tiene asignado un asesor que guía el proceso durante todos los semestres de desarrollo de éste, la calificación obtenida del desarrollo del proyecto corresponde al 28% de todas las asignaturas que el estudiante está cursando.

### **2.2 Instrumentos**

El desarrollo de los proyectos integradores, tienen en su esencia la finalidad de promover y fortalecer la investigación formativa en los estudiantes, a la par que las competencias para la solución de problemas del contexto. En ese orden de ideas, las fases de evaluación del proyecto, se direccionan según las instancias de validación del proceso de investigación propuesto por Samaja [20]. Los componentes evaluados se describen en la Tabla 1.

**Tabla 41.** Componentes evaluativos de los proyectos integradores de la Facultad de Ingeniería

Componente	Evaluador	Porcentaje
Escrito (validación conceptual): Valoración del diseño del proyecto, contiene los elementos teóricos y metodológicos que sustentan un avance investigativo del proyecto.	Docente asesor	4%
Técnico (validación empírica): Valoración por parte del asesor del nivel de avance de la solución del problema.	Docente asesor	4%
Transdisciplinar (validación operativa): Valoración por parte de los docentes de las asignaturas del semestre acerca del nivel de creatividad y pensamiento crítico implicado en la aplicación de los componentes de las asignaturas que el estudiante cursa al desarrollo de la solución del proyecto.	Docentes de las asignaturas	8%
Expositivo (validación expositiva): Valoración del nivel de desarrollo de los objetivos del proyecto por parte de dos evaluadores docentes donde se consideran igualmente, habilidades de argumentación desde el discurso técnico y científico.	Docentes evaluadores externos	8%
Actitudinal (competencias del saber ser): Valoración por parte del asesor de las habilidades sociales encaminadas al desarrollo del proyecto tanto de forma grupal como individual, igualmente comprende procesos de autoevaluación y coevaluación por parte del estudiante.	Docente asesor e integrantes del proyecto	4%
	$\sum$ %	28%

De la Tabla 41, se identifica la correlación existente entre los aspectos evaluativos del proyecto integrador y las instancias de validación propuestas por Juan Samaja. Los componentes antes mencionados, se desagregan en una matriz evaluativa o rúbrica que realiza una correspondencia entre las competencias de ABET [21], y las competencias TUNING para Latinoamérica [22]. La Tabla 42 realiza la correspondencia entre las competencias ABET y competencias TUNING, esta correspondencia se tiene en cuenta para el diligenciamiento de la rúbrica evaluativa por parte de docentes y estudiantes que puede verse en la Tabla 43.

**Tabla 42.** Relación entre competencias ABET y competencias TUNING en el marco de los Saberes

Tipo de SABER	Competencia ABET	Competencia TUNING
Actitudinal (SABER SER)	d. Participa y se integra en forma efectiva en equipos multidisciplinares de trabajo y es capaz de liderarlos	Capacidad de trabajo en equipo
	f. Comprende la responsabilidad profesional, ética, legal y social de la profesión que ejerce.	Capacidad de motivar y conducir a metas comunes
	i. Reconoce la necesidad de mantener sus conocimientos y habilidades actualizados de acuerdo con los avances de la disciplina y la tecnología.	Responsabilidad social y compromiso ciudadano
	h. Comprende el impacto que las soluciones de ingeniería de sistemas tienen sobre las personas y el entorno en un contexto local y global.	Compromiso ético
Cognitivo (SABER)	a. Aplica los conocimientos y habilidades en ciencias, matemáticas e ingeniería para resolver problemas de ingeniería de sistemas.	Habilidad para trabajar en forma autónoma
	e. Identifica, formula y resuelve problemas de ingeniería de sistemas usando las técnicas, métodos y herramientas apropiadas.	Compromiso con la calidad
	b. Diseña y realiza experimentos y pruebas analizando e interpretando resultados	Compromiso con la preservación del medio ambiente
	k. Capacidad de usar las técnicas, habilidades y herramientas modernas de la Ingeniería necesaria para la práctica Ingenieril.	Compromiso con su medio socio-cultural
Procedimental (SABER HACER)	c. Diseña sistemas informáticos que satisfacen requerimientos y necesidades considerando restricciones realistas de seguridad y sustentabilidad.	Valoración y respeto por la diversidad y multiculturalidad
	g. Se comunica de manera efectiva en forma oral, escrita y gráfica e interactúa con diferentes tipos de audiencias.	Capacidad de abstracción, análisis y síntesis
	j. Conoce y propone soluciones a los problemas contemporáneos.	Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas
		Capacidad de aprender y actualizarse permanentemente
Transdisciplinar (SABER CONOCER)		Conocimientos sobre el área de estudio y la profesión
		Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas
		Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica
		Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación
	Capacidad para organizar y planificar el tiempo	
	Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación	
	Capacidad para tomar decisiones	
	Capacidad para formular y gestionar proyectos	
	Capacidad crítica y autocrítica	
	Capacidad de comunicación oral y escrita	
	Capacidad de comunicación en un segundo idioma	
	Habilidades interpersonales	
	Habilidad para trabajar en contextos internacionales	
	Capacidad de investigación	
	Capacidad creativa	

Se obtiene que, al identificar tipos de saberes por competencia, es posible reorganizar las competencias de tal forma que se realice una aplicación de éstas en las diferentes temáticas de la asignatura. Con base en los descriptores propuestos en la Tabla 43, cada docente y evaluador, realiza una evaluación del proyecto y anota las respectivas observaciones. Se tiene que igualmente, cada elemento es evaluado con base en el proyecto integrador y la forma en que cada asignatura le aporta a la solución a la cual se quiere llegar en el proyecto.

**Tabla 43.** Descriptores de evaluación de los proyectos que corresponden a las competencias ABET

Item	Descriptor
1	Aplicación de conocimientos y habilidades en ciencias, matemáticas e ingeniería para resolver problemas de ingeniería.
2	Diseño y realización de experimentos y pruebas analizando e interpretando resultados.
3	Diseño de sistemas o modelos que satisfacen requerimientos y necesidades considerando restricciones realistas de seguridad y sustentabilidad.
4	Trabajo en equipo e integración con otros grupos.
5	Identificación, formulación y resolución de problemas de ingeniería usando las técnicas, métodos y herramientas apropiadas.
6	Comprensión de la responsabilidad profesional, ética, legal y social.
7	Comunicación efectiva en forma oral, escrita y gráfica e interacción con diferentes tipos de audiencias.
8	Comprender el impacto de las soluciones propuestas por el proyecto sobre las personas y el entorno en un contexto local y global.
9	Reconocimiento de la necesidad de actualizar conocimientos de acuerdo con los avances de la disciplina y la tecnología.
10	Conocer y proponer soluciones a los problemas contemporáneos.
11	Utilización de técnicas, habilidades y herramientas modernas de la ingeniería necesarias para la práctica ingenieril.
12	Avance del entregable respecto al semestre anterior.
13	Asistencia a las asesorías.
14	Elaboración de artículo.
15	Avance de elaboración de informe final respecto al semestre anterior.
16	Relación con las asignaturas del semestre.
17	Puntualidad en las entregas.

### 2.3 Procedimiento

La evaluación de las competencias se realiza en los momentos propuestos en la Tabla 41, cada momento de evaluación se realiza según una rúbrica que posteriormente es desagregada según los aspectos de la Tabla 43, la cual es diligenciada por el docente asesor del proyectos. Cada asignatura le aporta al desarrollo del proyecto en un porcentaje previamente definido por el pleno de los docentes de la Facultad, quienes, deciden los niveles de puntuación a los que aporta al desarrollo de las competencias de ABET. Con base en los datos suministrados por los evaluadores, se realiza un gráfico poligonal normalizado [17], en el cual se distinguen niveles de desarrollo relativos respecto a lo predefinido por los docentes de asignatura, el gráfico plantea niveles máximos, medios y mínimos con líneas verdes, amarillas y rojas respectivamente. Los resultados se obtienen semestralmente para cada proyecto y permiten identificar niveles de avance del proyecto semestre a semestre. Para el registro de la información se utiliza un Sistema de Evaluación de Proyectos Integradores (SEPI), en el cual los estudiantes pueden visualizar sus resultados [23].

## 3. RESULTADOS

De los datos obtenidos en los instrumentos de evaluación se obtienen los valores de la Tabla 4.

**Tabla 44.** Razón obtenida por puntajes para uno de los proyectos integradores. Cada razón se obtiene con base en la proporción obtenida respecto a los puntajes esperados para cada competencia

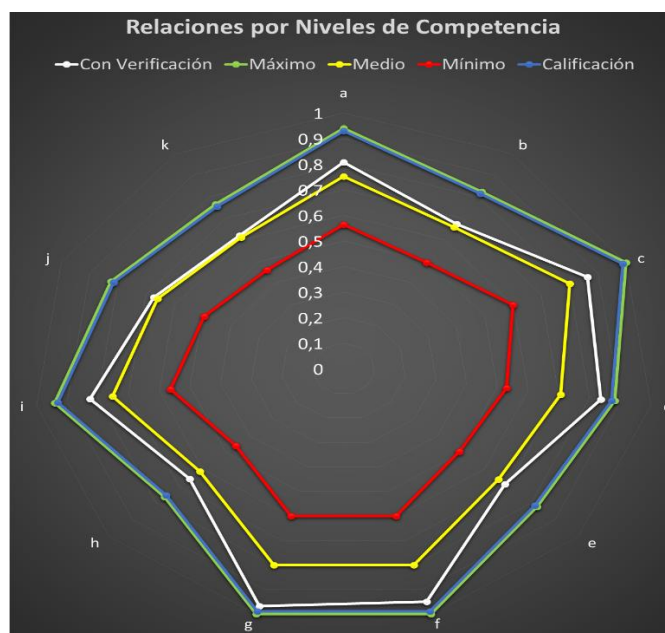
Competencia	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
Razón con Verificación	0.81	0.67	0.86	0.84	0.69	0.95	0.97	0.66	0.83	0.67	0.62
Razón máxima	0.94	0.82	1.00	0.88	0.82	1.00	1.00	0.76	0.94	0.82	0.76
Razón media	0.75	0.66	0.80	0.71	0.66	0.80	0.80	0.61	0.75	0.66	0.61
Razón mínima	0.56	0.49	0.60	0.53	0.49	0.60	0.60	0.46	0.56	0.49	0.46
Calificación	0.93	0.81	0.99	0.87	0.81	0.99	0.99	0.76	0.93	0.81	0.76
Puntaje esperado	16.00	14.00	17.00	15.00	14.00	17.00	17.00	13.00	16.00	14.00	13.00

Al representar los valores numéricos de la Tabla 44, se genera un diagrama poligonal (Figura 1) en el cual, cada una de las puntas representa una competencia de ABET. En la primera fila, la razón con verificación representa la aplicación del instrumento por parte de evaluadores externos, esta verificación permite una curaduría del proceso.

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, puede observarse cómo, al realizarse una curaduría del proceso evaluativo de los proyectos, se presenta un cambio sustancial, si se compara la línea blanca con la línea azul, puede observarse la diferencia en las percepciones de la evaluación. La línea azul, presenta la perspectiva del docente asesor, mientras la línea blanca, representa la evaluación de los docentes externos. Diferencias similares se hallaron en [18], donde puede verificarse cómo los estudiantes podrían de alguna forma sobrevalorar su desempeño.

Para este caso, el asesor también valora en gran medida el desempeño de sus estudiantes generándose de esta forma un posible proteccionismo a los efectos evaluativos del proceso. Si bien es cierto que deben establecerse aspectos medibles en la evaluación de competencias [3], el acto de evaluarlas debe ser triangulado y referenciado por actores externos a la institución y al ecosistema de aprendizaje, de tal suerte que pueda configurarse una suerte de *Weltanschauung* que “No solo sirve como guía para esfuerzos empíricos sino también como un filtro perceptual que puede excluir datos e interferencias causales que podrían ser incompatibles con el contexto del...paradigma en sí” [24].



**Figura 1.** Polígono de relaciones de niveles de competencia para un proyecto integrador de la Facultad de Ingeniería

Este proceso de reconocimiento transforma o amplía el *Umwelt Lehre* en el cual “cada organismo, separa de la multiplicidad de objetos circundantes un pequeño número de características a las cuales reacciona y cuyo ensamblaje configura su “ambiente”. Todo el resto es no-existente para ese particular organismo” [25].

Como conclusión, se identifica que este tipo de estrategias evaluativas, permiten una resignificación de la labor de las Instituciones de Educación Superior, en tanto constituyen un ejercicio reflexivo del quehacer docente. Es allí donde se encuentran los aspectos más sensibles del acto de evaluar competencias.

Como aspectos relevantes del desarrollo de la metodología de evaluación, se identifica la importancia de establecer un marco referencial de homologación de competencias entre acreditadoras internacionales, este marco posibilita la identificación de indicadores de competencia que posteriormente pueden ser evaluados con base en actividades desarrolladas por los estudiantes y que se dirigen a la solución de problemas propios de la profesión en la cual se está formando.

Los principios teleológicos de las IES (misión, visión, objetivos estratégicos), deben contrastarse continuamente con las necesidades del entorno y el tipo de graduado que se está formando en la realidad, es así como este tipo de ejercicios evaluativos posibilitan un marco regulatorio que establece el nivel de diferencia entre el estado esperado y el estado actual del acto educativo.

Como futuras adaptaciones e implementaciones, se propone adelantar este tipo de estudios para el desempeño de egresados para así configurar un índice de efectividad por programa que interrelacione los indicadores de competencia, se propone el cálculo del área de la región poligonal y compararla con resultados obtenidos de la metodología de análisis envolvente de datos (DEA) [26], donde mediante el uso de la programación lineal, se plantea un modelo de optimización en el cual se establecen relaciones entre inputs y outputs del proceso, también denominados unidades de toma de decisión (DMU por sus siglas en inglés), con la finalidad de identificar niveles de eficiencia, para tal efecto se utilizará el software de medición de eficiencia (EMS) [27].

La evaluación de competencias, debe ser un esfuerzo por conocer el estado real de la educación en la IES, actualmente es común pensar en el Aprendizaje Basado en Competencias como la opción más viable para generar espacios de aprendizaje en los estudiantes, pero no se ha pensado demasiado acerca de los espacios de aprendizaje para docentes, administrativos y en general para toda la Institución, este tipo de ejercicios deberían estar encaminados hacia ese nuevo horizonte, concibiendo de esta forma a la institución como un sistema.

El tipo de evaluaciones que aquí se plantean pueden ser utilizadas para tomar decisiones en la política de los objetivos estratégicos de la facultad. En ese orden de ideas, vale la pena afinar los mecanismos de aplicación de estrategias de trabajo en el aula y de articulación de procesos con los procesos de extensión, investigación y docencia, de tal forma que se logre consolidar un sistema tendiente a formalizar modelos de gestión de conocimiento en las Instituciones Educativas de Educación Superior.

## REFERENCIAS

- [1] ABET (2015). [ABET | ABET accreditation](#). Online [Nov 2017].
- [2] Meier, R., Williams, M. & Humphreys, M. (2000). Refocusing our efforts: Assessing non-technical competency gaps. *Journal of Engineering Education* 89(3), 377-385.
- [3] Male, S. (2010). Generic Engineering Competencies: A Review and Modelling Approach. *Education Research and Perspectives* 37(1), 25-51.
- [4] Henri, M., Johnson, M. & Nepal, (2017). A Review of Competency-Based Learning: Tools, Assessments, and Recommendations. *Journal of Engineering Education* 106(4), 607-638.
- [5] Abdulaal, R. et al. (2011). Design and implementation of a project-based active/cooperative engineering design course for freshmen. *Journal of Engineering Education* 36(4), 391-402.
- [6] Veldman, F. et al. (2008). Can Engineering education in South Africa afford to avoid problem-based learning as a didactic approach? *European Journal of Engineering Education* 33(5-6), 551-559.
- [7] Bensah, E., Ahiekpor, J. & Boateng, C. (2011). Migrating from subject-based to competency-based training in Higher National Diploma Chemical Engineering: The case of Kumasi Polytechnic. *Education for Chemical Engineers* 6(3), 71-82.
- [8] Lin, T. et al. (2013). An investigation of learners' collaborative knowledge construction performances and behavior patterns in an augmented reality simulation system. *Computers and Education* 68, 314-321.
- [9] Oladiran, M. et al. (2011). Global engineering teams - A programme promoting teamwork in engineering design and manufacturing. *European Journal of Engineering Education* 36(2), 173-186.
- [10] Evans, J. et al. (2015). An assessment architecture for competency-based learning: Version 1.0. In: *Frontiers in Education Conference*.
- [11] García, D. (2014). La estrategia de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP): Hacia un modelo constructivista en los programas de Ingeniería. *Innovación, Ingeniería y desarrollo* 2(2), 21-36.
- [12] McLeod, S. (2015). [Jean Piaget](#). Online [Nov 2017].
- [13] Kwietniewski, K. (2017) Literature Review of Project Based Learning. *Career & Technical Education Theses*.
- [14] Shabani, K., Khatib, M. & Ebadi, S. (2010). Vygotsky's Zone of Proximal Development: Instructional Implications and Teachers' Professional Development. *Canadian Center of Science and Education*.
- [15] Dewey, J. (1916). *Democracy and Education*. Macmillan.
- [16] Crawley, E. (2001). *The CDIO Syllabus A Statement of Goals for Undergraduate Engineering Education*. CDIO.
- [17] Dowling, D. Carew, A. & Hadgraft, R. (2010). *Engineering Your Future*. Wiley.
- [18] Kogitkov, N., Dukhanov, A. & Bochenina, K. (2016). Modeling Knowledge Transfer and the Transdisciplinary Effect on Project-based Learning Activities. *Procedia Computer Science* 80, 1989-1999.
- [19] Torrez, H. et al. (2011). Implicación del estudiante y del tutor en la evaluación de las competencias desarrolladas durante el proyecto final de carrera. *Revista de investigación educativa* 31(1), 239-255.
- [20] Corporación Universitaria Americana (2016). *Formación por Procesos Autorregulativos -FPA- Modelo Pedagógico*. Coruniamericana.
- [21] Samaja, J. (1999). *Epistemología y Metodología - Elementos para una teoría de la investigación científica*. Eudeba.
- [22] Beneitone, P. et al. (2007). *Reflexiones y perspectivas de la Educación Superior en América Latina. Informe Final - Proyecto Tuning - América Latina 2004-2007*. Universidad de Deusto.
- [23] Cevallos, G. et al. (2016). Sistema de Evaluación de Proyectos Integradores. *Revista Atlante* 3, 1-16.
- [24] Sutherland, J. (1973). *A general systems philosophy for the social and behavioral sciences*. Wiley.
- [25] Bertalanffy, K. (1930). *Tatsachen und Theorien der Formbildung als Weg zum Lebensproblem*. Erkenntnis.
- [26] Cooper, W., Seiford, L. & Tone, K. (2007). *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Kluwer Academic Publisher.
- [27] Holger, S. (2000). [Manual de programa EMS](#). Online [Nov 2017].

# Relación entre TIC, TAC y TEP y el aprendizaje colaborativo en Instituciones de Educación Superior: Estudio de caso para programas de Ingeniería de Sistemas

Gustavo A. Araque G.<sup>1</sup>

David A. García A.<sup>2</sup>

César F. Henao V.<sup>3</sup>

Corporación Universitaria Americana  
Medellín – Antioquia

Desde el año 2014 se gestó en la facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Americana un proceso de construcción e implementación de estrategias de formación de contextos y comunidades que desde la academia promueven el desarrollo integral de Ingenieros. En esa misma dinámica de compartir y crear, se identifica la influencia de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en el aprendizaje y el conocimiento (TAC) para el empoderamiento y la participación (TEP), donde fundamentalmente las TIC mediadas por la curaduría del docente, son la plataforma para aprender, participar, investigar y conocer. El presente escrito analiza, el desarrollo del aprendizaje colaborativo apoyado en TIC para disminuir los efectos de adivinación en las evaluaciones de opción múltiple y, por lo tanto, para revelar el verdadero conocimiento de los estudiantes. Igualmente, mediante una metodología mixta y con técnicas de análisis discursivo, se puso de manifiesto la incidencia de las TIC, TAC y TEP en la apropiación de competencias relacionadas con el aprendizaje colaborativo con base en el cuestionario planteado por [1]. Como conclusiones se presentan los resultados obtenidos de las relaciones entre el uso de las tecnologías y el aprendizaje colaborativo para el establecimiento de una estrategia metodológica para estos análisis en el marco de los planteamientos esbozados por [2].

## 1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje colaborativo es un concepto muy amplio y universal en la investigación educativa. Aprender de los demás y con los demás puede fomentar un aprendizaje más profundo en asignaturas de Ingeniería de Sistemas, haciendo uso de plataformas como Moodle para evaluaciones de selección múltiple, inicialmente de manera individual y luego de forma colaborativa. Este trabajo aborda el problema de promover el aprendizaje en los estudiantes de la Corporación Universitaria Americana, adscritos al programa de Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Ingeniería. El aprendizaje colaborativo es un enfoque pedagógico, que ayuda a mejorar el rendimiento de aprendizaje [3]. Este tipo de entorno de aprendizaje conduce a aprendizaje más profundo mientras que los estudiantes se enseñan mutuamente al abordar dudas y proceden a realizar ellos mismos aclaraciones de conceptos erróneos.

En el entorno de aprendizaje colaborativo, los estudiantes obtienen diferentes perspectivas y, por lo tanto, articulan y defienden sus propias ideas. [4] Sentó las bases para el aprendizaje colaborativo. Su concepto de aprendizaje, llamado zona proximal de desarrollo, arroja dudas sobre las pruebas basadas en el conocimiento como medios adecuados para medir el nivel de conocimiento de los estudiantes. [4] sostuvo que, con el fin de medir el nivel de conocimiento verdadero, es requerido examinar la capacidad de resolver problemas de forma independiente y en un grupo. Determino que es un problema más complejo medir el conocimiento de los estudiantes quienes están trabajando en un grupo. Una forma de estimular la colaboración entre iguales y, al mismo tiempo, midiendo el rendimiento individual es haciendo uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en el aprendizaje y el conocimiento (TAC) para el empoderamiento y la participación (TEP), utilizando plataformas como Moodle.

Como un ejemplo relacionado con lo anteriormente planteado y considerando el papel de la tecnología en la educación para la complejidad, se resalta la importancia de una visión interdisciplinaria de integración de herramientas para la educación denominado Dispositivos Hipermedial Dinámico (DHD), el cual se conceptualiza como “una red social mediada por las TIC -red sociotécnica- en el contexto físico-virtual, donde participan los sujetos enunciando sus discursos y acciones del saber en los órdenes ético-filosóficos, disciplinares y tecnológicos, indagando, aprendiendo, dialogando, confrontando, diseminando, realizando procesos de transformación sobre objetos, regulados según la necesidad y el caso, por una “coordinación de contratos” integrados a la modalidad del taller” [5].

Igualmente se resalta que “un DHD no es solamente la tecnología, sino fundamentalmente la trama compleja de los individuos mediatizados por las TIC en un marco organizacional de participación responsable. Es decir, esta complejidad implica observar dinámicamente: los vínculos que se generan entre los sujetos intervinientes, la tecnología soporte, los contenidos disciplinares involucrados, y el marco organizacional/institucional en función de la calidad de los procedimientos interactivos dentro de una ética de participación responsable” [5]. Trabajos realizados por [6], se orientan hacia la modelación del “Dispositivo Hipermedial Dinámico para el seguimiento de los complejos procesos de interacción que en él ocurren, y utilizar dicho modelo para el diseño e implementación de una herramienta flexible que integre métricas adecuadas para la evaluación de las participaciones”. Éste tipo de

---

<sup>1</sup> [garaque@americana.edu.co](mailto:garaque@americana.edu.co)

<sup>2</sup> [dagarcia@coruniamericana.edu.co](mailto:dagarcia@coruniamericana.edu.co)

<sup>3</sup> [chenao@coruniamericana.edu.co](mailto:chenao@coruniamericana.edu.co)



dispositivos posibilitan una articulación de relaciones en un entorno complejo. Algunos estudios destacan la efectividad de los métodos de aprendizaje colaborativo apoyados por las TIC porque promueve el aprendizaje activo a través del compromiso de los estudiantes [3]. Por ejemplo, en su investigación, [7] se basa en la responsabilidad social en la acción educativa a través del uso de las TIC para evaluar preguntas conceptuales en clase.

[8] menciona la necesidad de que la colaboración y la coordinación entre los docentes sea una cualidad y una capacidad que se adquiera por los futuros docentes, y que se encuentre basada en la confianza, el apoyo mutuo y el aprendizaje compartido profesional, [9]. Por eso, es muy importante diseñar y desarrollar metodologías más participativas, fundamentadas en la comunidad práctica donde el conocimiento es situado, colaborativo y reiterativo [10], es así donde la metodología favorece la participación y la intercomunicación entre los estudiantes y se logra la responsabilidad compartida.

Otros espacios relacionados con las nuevas tendencias de redireccionamiento de TIC son los foros virtuales. Tal y como lo indica [5], “un foro es un espacio virtual comunicativo y/o colaborativo en el que todo un grupo toma parte en un debate sobre un tema que sea de interés general. La idea de foro se extiende actualmente a cualquier reunión de expertos de carácter informativo sobre algún tema en particular. Sin embargo, este término no es nuevo ya que, en la antigua Roma, el foro o comitium era el lugar donde se reunía el Senado. Pese a esto, y en el círculo de las personas más próximas a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, especialmente Internet, la idea de foro está asociado a la virtualidad, a un espacio asincrónico; un lugar de expresión, opinión y consulta de sus integrantes, potenciando las comunicaciones y posibilitando el contacto y conocimiento entre los mismos. Uno de sus objetivos básicos es lograr la participación de los integrantes en el debate de temas específicos, reflexionar, y compartir informaciones desde y a todo el grupo. Otros objetivos, no menos importantes, son: socializar las producciones entre todos los participantes, debatir sobre diversos aspectos planteados tanto por los docentes como por los propios estudiantes, y estimular el pensamiento creativo en la solución de problemas.”

Desde esta perspectiva, el foro virtual se constituye en una herramienta de segundo orden de intercambio de experiencias y conocimiento que posibilita complementar la formación de los programas de Ingeniería en Instituciones de Educación Superior, siempre que sea direccionado en un marco similar a una Estrategia de Formación por Proyectos altamente pertinente para un enfoque de Formación por Procesos Autorregulados y en consonancia con la formación de comunidad académica. El foro, está configurado para propender por la elaboración de una mirada más holística que posibilite la comprensión de diversos ejes que trascienden las miradas de la enseñanza y el aprendizaje desde una perspectiva del pensamiento complejo y con enfoque transdisciplinar. En ese orden de ideas, el foro virtual, así como otras herramientas TAC y TEP, se fundamentan en al menos tres fuentes epistemológicas y de investigación [5]:

1. *Modelo psicológico didáctico*. Siguiendo a [6], se puede afirmar que “el conocimiento se construye socialmente por medio de esfuerzos cooperativos dirigidos a metas compartidas, o de diálogos y cuestionamientos que nacen de las diferencias que existen entre las perspectivas de las personas”. Es mediante este proceso de negociación y diálogo de las perspectivas del conocimiento y la información que se confrontan ideas tanto desde la generación de un conflicto (entendido como diferencias de intereses respecto a una postura) o desde la descripción de éstas.
2. *Modelo comunicacional*. Se propende por una estrategia de comunicación de la información situada desde la analogía de la orquesta, donde hay una multidireccionalidad de los mensajes, signos y significados y distintas formas de expresión que se enfocan en un lenguaje universal implícito hacia una finalidad propuesta por el foro que será dinamizada en la medida que la comunidad genere consensos que trasciendan a nuevos niveles de conceptualización, aplicación y construcción.

“La analogía de la orquesta tiene la finalidad de hacer comprender cómo puede decirse que cada individuo participa en la comunicación, en vez de decir que constituye el origen o el fin de la misma. La imagen de la partitura invisible recuerda más precisamente el postulado fundamental de una gramática del comportamiento que cada uno usa para sus intercambios más diversos por el otro. En este sentido podríamos hablar de un modelo orquestal de la comunicación, por oposición al “modelo telegráfico” (comunicación de conocimiento científico). El modelo orquestal, de hecho vuelve a ver en la comunicación el fenómeno social que tan bien expresaba el primer sentido de la palabra, tanto en francés como en inglés; la puesta en común, la participación, la comunión” [7].

3. *Modelo tecnológico*. Como tendencia derivada de la implementación de la Estrategia de Formación por Proyectos y desde el enfoque pedagógico que se ha llevado a cabo se identifica la necesidad de plantear un espacio alterno a la estrategia TAC o TEP que complemente lo presentado en desde un formato de visualización plano con los moderadores identificando de forma adecuada los roles de los participantes y su relación con el proyecto que llevan a cabo. Según su objetivo didáctico, las estrategias TAC y TEP están orientadas hacia la construcción colectiva de diversas dimensiones del conocimiento que aportan a los proyectos desarrollados por los estudiantes en las siguientes etapas:

- Motivación – Integración social
- Indagación de conocimientos previos
- Introducción de un tema de análisis

- Presentación de nueva información
- Análisis-Diferenciación de elementos de la nueva información
- Ejercitación
- Síntesis-Integración
- Evaluación
- Transferencia-Aplicación
- Análisis metacognitivo

Dados los constantes y permanentes cambios que sugiere el siglo XXI, el profesor de ingeniería sin perder su esencia debe adaptarse al contexto actual y repararse hacia el futuro en el que los recursos tecnológicos y exigencias del sector externo obligarán a replantear su rol. Se ha considerado fundamental la formación de los profesores, como uno de los ejes fundamentales de la calidad en la enseñanza de la ingeniería. La instrucción docente en didáctica y pedagogía, y el uso de las TIC y la virtualidad para la enseñanza de la ingeniería, son dos elementos fundamentales para la formación de profesores en Iberoamérica. Entre los objetivos de formación se destacan: aportar los conocimientos y herramientas para ejercer la labor del profesor de ingeniería; compartir información y experiencias alrededor de la formación de profesores; constituir una red de profesores que trabajen e investiguen en la enseñanza de la ingeniería.

A raíz de la tendencia mundial de la transferencia tecnológica en el sector industrial y productivo, se generan una serie de beneficios indirectos para la innovación y el desarrollo tecnológico en la educación en ingeniería en Iberoamérica, como la generación de nuevos conocimientos, la formación de recursos humanos calificados, el mejoramiento de la infraestructura y el equipamiento, y el establecimiento de redes de conocimiento. Como objetivos estratégicos se pretende contribuir a maximizar el aporte de las facultades de ingeniería al desarrollo territorial sostenible en su espacio de influencia en un marco de fortalecimiento de la cooperación regional, al igual que promover y fortalecer las actividades de desarrollo tecnológico, transferencia de conocimientos tecnológicos y contribución a las innovaciones en las Facultades de Ingeniería atendiendo a las necesidades socio-productivas locales y a la integración regional.

En ocasiones el primer problema es diseñar preguntas que vayan más allá de niveles de pensamiento donde se logre un conocimiento colaborativo, donde se obtenga los niveles que se deben de tener en la educación superior: analizar, evaluar y crear [8]. Se señala entonces que es posible diseñar cuestionarios de opción múltiple que logren desarrollar el pensamiento de orden superior, abriendo la posibilidad de mejorar las habilidades de los estudiantes. Por otro lado, algunos investigadores argumentan que cuando se usa herramientas TIC donde se colocan preguntas de selección múltiple, solo se está considerando el conocimiento de un hecho o suceso [9]. Por lo tanto, muchos instructores ofrecen la manera más fácil de manipular la dificultad de la prueba, es decir, variar el número de opciones múltiples alternativas y colocarlas de forma aleatoria.

Existe una visión opuesta en la investigación reciente de [10], donde se afirma que las pruebas de opción múltiple pueden promover el aprendizaje profundo y aumentar la retención a largo plazo, incluso cuando no se da retroalimentación correctiva. De acuerdo con estos estudios, las pruebas de opción múltiple pueden estimular el tipo de recuperación procesos conocidos por mejorar el aprendizaje [10]. En esto caso, los instructores deben proporcionar a los estudiantes una estrategia metacognitiva para fomentar un pensamiento más complejo. Esta estrategia es dirigida a considerar todas las alternativas para que no solo se obtenga la respuesta correcta, sino también que se logre por parte del docente evitar distractores incorrectos.

Sin embargo, la aplicación de estrategias metacognitivas puede plantear el otro problema serio de evaluación: si los estudiantes pueden eliminar algunas respuestas en base al análisis crítico, pueden obtener la respuesta correcta con conjeturas parciales, el nivel de las cuales a menudo es difícil de evaluar correctamente [11], [12]. El propósito de estos métodos apoyados en las TIC es aliviar los efectos de adivinación pura en elementos de opción múltiple y, por lo tanto, para revelar el verdadero conocimiento de los estudiantes. Es por esto importante que los estudiantes respondan las preguntas después de realizar discusiones entre pares.

En esta investigación se enfatiza la importancia de usar nuevas tecnologías en la educación universitaria, lo cual es significativo para los docentes y se muestra la posibilidad de implementar en la enseñanza como el método de propuesta para un trabajo colaborativo, en algunos aspectos, para desarrollar las habilidades requeridas. Desde el punto de vista del estudiante, las tecnologías brindan oportunidades para motivar el aprendizaje y también matices colaborativos. Aprender a utilizar la tecnología es importante, pero también en los contextos educativos debe estar directamente relacionado con el aprendizaje contenido que se enseña. Estas tecnologías deberían ayudar a cumplir con las competencias previamente diseñadas. En este sentido, las estrategias de formación profesional que fundamentan el desarrollo del trabajo académico e investigativo de carácter Multidisciplinario, Interdisciplinario y Transdisciplinario, se constituyen en la base fundamental para el logro productivo, de excelencia y con éxito, de los propósitos sustantivos, de los procesos de aprendizaje y en la generación y producción de nuevo conocimiento significativo en ciencia, tecnología e innovación:

En primer lugar, el modo de hacer ciencia, tecnología e innovación, debe estar enfocado sustancialmente a la resolución de las problemáticas reales de la sociedad en general, que tengan un impacto directo y positivo en el mejoramiento de la calidad de vida de los individuos que la constituyen. Para lograr este cometido, se hace uso

entonces de métodos de desarrollo de la industria intensiva en altas tecnologías, procesos de competitividad abierta, enfoque en el fortalecimiento de la industria global, en redes, en cadenas productivas y en clusters, en procesos intensivos de control y automatización robótica, de sistemas expertos e inteligencia artificial, de políticas de producción y con tecnologías limpias, que soportan la generación de productos y resultados sustentables; con la vinculación de personal con formación, técnica, tecnológica y profesional altamente calificado y necesariamente fundamentado en metodologías, métodos, estándares internacionales, marcos de referencia y mejores prácticas, orientados al logro de trabajo en equipo y generación de comunidades de trabajo, de formación académica, de investigación desde la básica hasta la de alto impacto, posibilitando de esta forma, que cada uno de los actores que se vinculan al proceso y que hacen parte de la comunidad empresarial, industrial, comercial, académica y social en última instancia, tenga la posibilidad de construir y reconstruir, su propia capacidad de acción y por tanto diferenciar claramente su aporte en la sociedad, en referencia con los procesos de generación, producción, comprensión, utilización, incorporación, validación, adquisición, apropiación y desarrollo de nuevo conocimiento innovador y creativo, contribuyendo al mismo tiempo de forma productiva y con alta calidad, en el desarrollo de procesos de aprendizaje significativo social individual, colectivo y en comunidad.

## **2. MÉTODO**

La sociedad actual está inmersa en el desarrollo de la tecnología, donde el progreso de la información, las Tecnologías de la Comunicación y las Comunicaciones (TIC) han cambiado nuestra forma de vida, impactando en muchas áreas de conocimiento, es así que se realiza la investigación con los estudiantes de Ingeniería de Sistemas mediante el uso de plataformas TIC, demostrado ser un gran apoyo tanto para docentes como para estudiantes.

### **2.1 Descripción del contexto y de los participantes**

Hoy, las TIC han afectado casi todos los aspectos de nuestro mundo, desde el comercio hasta la educación. Su influencia ha cambiado el estilo de vida cotidiano de muchas personas [13], [14]. La creciente introducción de las TIC en las universidades es actualmente evidencia [15]. Por lo tanto, las universidades tratando de adaptarse a las necesidades de la sociedad actual, debe prepararse para los desafíos del futuro, las oportunidades y beneficios de las nuevas tecnologías. El uso de las TIC en la práctica docente universitaria se considera una necesidad frente a la adaptación a los programas de Ingeniería, y en nuestro estudio en particular la Ingeniería de Sistemas en la Corporación.

El Desarrollo tecnológico y nuevas formas de comunicación obligan a la institución universitaria a reconsiderar la práctica educativa. Para esta investigación se analiza este problema mediante las estrategias para tomar exámenes al responder a una selección múltiple en diferentes semestres. Se estudia las siguientes subcategorías de estrategias, mediante el uso de las TIC, en particular la plataforma Moodle: gestión del tiempo, adivinanzas y consideración de intención [16], luego el proceso se analiza creando espacio de aprendizaje colaborativo donde los estudiantes además de lograr mejorar la cantidad de respuestas correctas se identifica una disminución en la adivinación, ya que debían sustentar ante su equipo de trabajo las respuestas seleccionadas.

Dados los constantes y permanentes cambios que sugiere el siglo XXI, el profesor de ingeniería sin perder su esencia, debe adaptarse al contexto actual y repararse hacia el futuro en el que los recursos tecnológicos y exigencias del sector externo obligarán a replantear su rol. Se ha considerado fundamental la formación de los profesores, como uno de los ejes fundamentales de la calidad en la enseñanza de la ingeniería. La instrucción docente en didáctica y pedagogía, y el uso de las TIC y la virtualidad para la enseñanza de la ingeniería, son dos elementos fundamentales para la formación de profesores. Entre los objetivos de formación se destacan: aportar los conocimientos y herramientas para ejercer la labor del profesor de ingeniería; compartir información y experiencias alrededor de la formación de profesores; constituir una red de profesores que trabajen e investiguen en la enseñanza de la ingeniería. A raíz de la tendencia mundial de la transferencia tecnológica en el sector industrial y productivo, se generan una serie de beneficios indirectos para la innovación y el desarrollo tecnológico en la educación en Iberoamérica, como la generación de nuevos conocimientos, la formación de recursos humanos calificados, el mejoramiento de la infraestructura y el equipamiento, y el establecimiento de redes de conocimiento.

La presente investigación se desarrolla en la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria sede Medellín. La Corporación Universitaria Americana es una institución de carácter privado que tiene sus sedes en las ciudades de Barranquilla, Medellín y Montería. La Universidad desarrolla sus funciones de docencia, investigación y extensión mediante la formación integral, el desarrollo del pensamiento crítico y autónomo de sus integrantes y la interacción con el entorno a través de proyectos orientados a la solución de problemas de la comunidad y el sector productivo. Igualmente, establece que "El principio institucional de la Corporación Universitaria Americana, se acentúa con una misión fundacional de inclusión, justicia y equidad que propenden por el desarrollo sostenible del país, alineada a la política educativa nacional". [17]

En la actualidad cuenta con más de 10000 estudiantes y se perfila como una institución que busca su acreditación en alta calidad en cada uno de sus programas, repartidos en la modalidad multicampus, la cual hace hincapié en la existencia de cuatro edificaciones principales en el centro de la ciudad. Específicamente, la Facultad de Ingeniería de la sede Medellín existe desde el año 2008 y cuenta actualmente con más de 280 estudiantes. La mayoría son trabajadores que cursan sus estudios en horario nocturno (18:00-22:00, lunes a viernes), sin embargo, se tienen

también horarios mixtos (viernes 18:00-22:00 y sábado 6:00-14:00) y horario matinal (6:00-12:00, lunes a viernes). Trabajan en ella 8 docentes de tiempo completo en ingeniería de sistemas, 4 docentes tiempo completo en ingeniería industrial y 3 administrativos (decano, director de programas y líder de estrategia formativa). Los programas se subdividen en semestres académicos, donde el programa de Ingeniería de Sistemas tiene una extensión de nueve semestres y el programa de Ingeniería Industrial de diez semestres. Cada semestre es evaluado en tres secciones o cortes repartidos de la siguiente forma: primer y segundo corte, examen parcial de 21% y talleres de 9%. Tercer corte, examen final de 28% y talleres del 12%.

Actualmente, la Facultad cuenta con diversos mecanismos y elementos, que articulados generan el espacio propicio para una construcción de comunidad académica encaminada a la solución de problemas en un contexto real y con sentido social, donde se propenda por la formación de egresados con estructura definida por el perfil planteado en la facultad y con gran capacidad para generar mecanismos de aprendizaje para toda la vida. Tales mecanismos son: proyectos integradores (desarrollados desde el año 2014), industria de software, semilleros, laboratorio estratégico de desarrollo de software, trabajos de grado, emprendimiento (spin offs y start ups), talleres curriculares e investigación formativa y aplicada.

## 2.2 Instrumentos

Para el análisis de la relación entre las Semestres de Nivel Inferior (primero, segundo, tercero, cuarto) y los Semestres de Nivel Superior (quinto, sexto, séptimo, octavo y noveno), en el programa de Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería y el Análisis Obtenido por la Plataforma TIC- Moodle respecto al tiempo que se toma en responder una pregunta de selección múltiple los estudiantes de Ingeniería de Sistemas en la Corporación Universitaria Americana y la Cantidad de Preguntas acertadas antes del aprendizaje Colaborativo/ Cantidad de Preguntas acertadas después del aprendizaje Colaborativo, se aplicaron los siguientes instrumentos:

- Informe detallado de cada una de las evaluaciones de los 234 estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Americana.
- Cantidad de tiempo tomada por cada estudiante para responder las preguntas
- Numero de preguntas acertadas antes de realizar el aprendizaje colaborativo
- Numero de preguntas acertadas después de realizar el aprendizaje colaborativo.

Para la identificación de la percepción de los estudiantes respecto al aprendizaje colaborativo, se realizaron las preguntas propuestas en Tabla 45.

**Tabla 45.** Descriptores para identificar la percepción respecto al aprendizaje colaborativo en la Corporación [1]

Descriptor
1. Mis compañeros se muestran reticentes a trabajar en grupo
2. El trabajo colaborativo ayuda a intercambiar los puntos de vista.
3. Mis compañeros comparten sus aprendizajes y responsabilidades cuando trabajan en grupo.
4. Mis compañeros suelen discutir e intercambiar ideas cuando trabajan en grupo
5. Mis compañeros se esfuerzan en compartir conocimientos cuando trabajan colaborativamente.
6. El trabajo en equipo promueve la implicación activa del grupo en el proceso de aprendizaje.
7. La interacción con compañeros incrementa el nivel de aprendizaje.
8. La interacción con compañeros ayuda a profundizar más en las ideas.
9. En equipo, trabajamos y aprendemos más rápido
10. En equipo se organizan mejor los trabajos
11. En equipo se aprende más y mejor que individualmente
12. En equipo me doy cuenta de mis errores y rectifico
13. En equipo construimos conjuntamente el conocimiento sobre el contenido a aprender.
14. Nos dividimos el trabajo y limitamos su coordinación a poner en común los resultados sin más.
15. En equipo aprendemos a ser más tolerantes y respetuosos con los demás.
16. Las explicaciones que se dan entre los miembros del equipo facilita la comprensión de conceptos.
17. El equipo ayuda a solucionar conflictos y resolver problemas
18. Aumenta la capacidad de relación con los otros miembros del grupo.
19. Fomenta y motiva el aprendizaje
20. Compartimos conocimientos adquiridos.
21. Los alumnos que son brillantes prefieren trabajar individualmente.
22. Los alumnos menos aventajados prefieren el trabajo colaborativo para así trabajar menos y aprovecharse del trabajo de los compañeros.
23. En general, prefiero trabajar individualmente.
24. La calidad de los trabajos realizados colaborativamente es mayor.
25. En equipo se tiene una mayor autonomía y control sobre su propio aprendizaje.
26. Es difícil para el profesor evaluar al alumno a través del trabajo colaborativo.
27. Los trabajos colaborativos requieren más dedicación de tiempo para el alumno.
28. Los trabajos colaborativos requieren más tiempo de preparación para el profesor.

## 2.3 Procedimiento

- Se identifica la cantidad de estudiantes que hay en los 2 grupos analizados
- Se relacionan número de estudiantes por semestre por tiempo tomado para resolver una pregunta, además de la cantidad de preguntas acertadas, antes y después de realizar el aprendizaje colaborativo.

- Como método de estudio, se utiliza un enfoque mixto de corte hermenéutico donde se estudian fundamentalmente las relaciones entre los actores del proceso y los entes adscritos a éste versus los entornos áulicos. De los hallazgos obtenidos de la implementación, se identifica el mecanismo de articulación de los actores al modelo de industria y las dificultades apremiantes de cara a un fortalecimiento de la relación universidad – empresa – estado [18], es solo a raíz del estudio de tales interrelaciones que se puede pretender un crecimiento más adecuado en aras de una construcción de colectividad académica. En esta investigación en particular, mediante el uso de las TIC.
- De la aplicación de la encuesta de la Tabla 45, se realiza un recuento de puntajes para 127 estudiantes de la Facultad de Ingeniería según la metodología propuesta por [1] , y en la cual se valida el instrumento indicando como ítems negativos los identificados con los números 1, 14, 21, 22, 23, 26, 27 y 28.

### 3. RESULTADOS

Con base en la estrategia metodológica de investigación, se obtuvieron los siguientes resultados diferenciados por semestre (Tabla 2).

**Tabla 46.** Análisis Obtenido por la Plataforma TIC- Moodle respecto al tiempo que se toma en responder una pregunta [1]

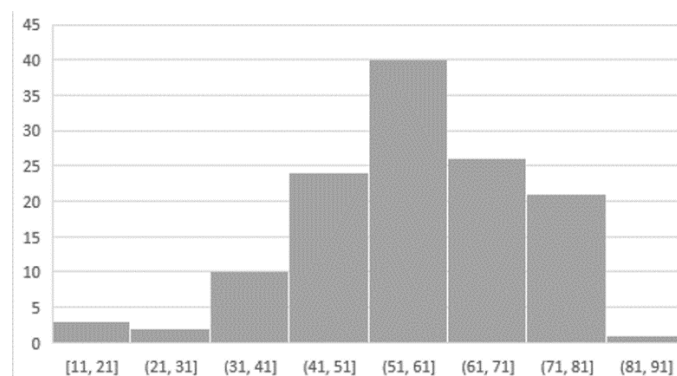
Semestre en el que se encuentra el estudiante	Análisis Obtenido por la Plataforma TIC- Moodle respecto al tiempo que se toma un estudiante en responder una pregunta de selección múltiple.	Preguntas acertadas antes del aprendizaje Colaborativo	Cantidad de Preguntas acertadas después del aprendizaje Colaborativo
Semestre 1	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 51 segundos.	5	12
Semestre 2	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 62 segundos.	10	13
Semestre 3	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 65 segundos.	7	14
Semestre 4	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 76 segundos.	8	16
Semestre 5	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 85 segundos.	7	16
Semestre 6	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 110 segundos.	18	20
Semestre 7	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 107 segundos.	14	18
Semestre 8	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 112 segundos.	16	18
Semestre 9	Evaluaciones de 20 preguntas donde el estudiante tiene 1 hora, demora en promedio por pregunta 120 segundos.	17	19

Con base en la información anterior, se obtiene la Tabla 3.

**Tabla 47.** Relación entre los Semestres de Nivel Superior e Inferior y el porcentaje de aumento de preguntas acertadas [1]

	Aumento en identificar la respuesta Correcta
Semestre de Nivel Inferior	82%
Semestre de nivel Superior	23%

Respecto a los puntajes obtenidos de la aplicación de la Tabla 45, se genera la distribución de la Figura 1, que muestra cómo la percepción respecto al aprendizaje colaborativo es significativamente positiva puesto que mayores puntajes implican una mayor percepción.



**Figura 2.** Distribución de puntajes obtenidos de la encuesta de la Tabla 1

### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación demuestran significativamente diferencias no solo en el uso de estrategias de adivinación, sino también un aumento en la discusión propositiva de las respuestas. Mientras que los estudiantes de

semestres altos quinto, sexto, séptimo, octavo y noveno, usaron estrategia de evitación de errores, sustentando mejor su respuesta, teniendo un mejor uso del tiempo, los estudiantes de primero, segundo, tercero y cuarto semestre, emplearon la estrategia de adivinar mucho más que el otro grupo y obtuvieron una mejora en la sustentación de las respuestas.

Estos resultados podrían ser interpretados de la siguiente manera. Los estudiantes de nivel superior tienen suficiente nivel de conocimiento para resolver las preguntas, por lo tanto, no se basan en gran medida en la estrategia de adivinar. Por el contrario, los estudiantes del grupo de nivel inferior toman conjeturas porque no tienen suficiente conocimiento para adoptar una estrategia deductiva. Como resultado, ambos grupos demostraron algunas conjeturas parciales en un intento de evitar distractores. En consecuencia, el nivel de adivinación depende no solo de la orden de habilidades de pensamiento, sino también en el nivel de conocimiento de los estudiantes.

Se observa que los estudiantes de la Facultad de Ingeniería tienen una tendencia a valorar el aprendizaje colaborativo, estudios anteriores para la misma Facultad presentaron una tendencia menor [19], este crecimiento en la tendencia podría explicarse por la implementación de proyectos integradores que median estrategias de aprendizaje basado en proyectos.

## REFERENCIAS

- [1] Quintero, A. et al. (2011). Qué piensan los profesores y alumnos sobre la metodología de aprendizaje colaborativo a través de TIC. En: XIX Jornadas Universitarias de Tecnología Educativa (JUTE).
- [2] Reig, D. (2012). Disonancia cognitiva y apropiación de las TIC. Revista TELOS 1, 1-2.
- [3] McDonough, K. & Foote, J. (2015). The impact of individual and shared clicker use on students' collaborative learning. *Computers & Education* 86, 236-249.
- [4] Vygostsky, L. (1978). *Mind in society. The Development of Higher Psychological Processes*. Harvard University Press.
- [5] San Martín, P. (2008). *Hacia un Dispositivo Hipermedial Dinámico*. Educación e investigación para el campo audiovisual interactivo. Universidad Nacional de Quilmes.
- [6] Luján, G. (2011). *La teoría de los sistemas complejos aplicada al modelado del Dispositivo Hipermedial Dinámico*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Rosario.
- [7] Smith, B. & Casati, R. (1994). Naive Physics, *Philosophical Psychology* 7(2), 227-247.
- [8] Montero, L. (2011). El trabajo colaborativo del profesorado como oportunidad formativa. *CEE Participación Educativa* 16, 69-88.
- [9] Hargreaves, A. & Fullan, M. (2012). *Capital Professional. Transforming Teaching in Every School* Teachers College Press.
- [10] Huber, G. (2008). Aprendizajes activos y metodologías educativas. *Revista de Educación NE*, 59-88.
- [11] Sanz, C. & Zangara, A. (2006). Los foros como espacios comunicacionales - didácticos en un curso a distancia. Una propuesta metodológica para aprovechar sus potencialidades. En: XII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.
- [12] Pea, R. (2001). Prácticas de inteligencia distribuida y diseños para la educación. En Salomon, G. (Ed.), *Cogniciones Distribuidas* (pp. 76-98). Amorrortu editores.
- [13] Bateson, G. et al. (1984). *La Nueva comunicación*. Kairós.
- [14] Anderson, L. et al. (2001). A taxonomy for learning teaching an assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Longman.
- [15] Butler, A. & Roediger, H. (2008). Feedback enhances the positive effects and reduces the negative. *Memory and cognition* 36(3), 604-616.
- [16] Bjork, E., Little J. & Storm, B. (2014). Multiple-choice testing as a desired difficulty in the classroom. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition* 3(3), 165-170.
- [17] Ben, A., Budescu, D. & Nevo, B. (1997). A comparative study of measures of partial knowledge in multiple-choice tests,» *Applied Psychological Measurement* 21(1), 65-88.
- [18] Kubinger, K. ET AL. (2010). On minimizing guessing effects on multiple-choice items: Superiority of a two solutions and three distractors item format to a one solution and five distractors item format. *International Journal of Selection and Assessment* 18, 111-115.
- [19] Martin, S. ET AL. (2011). New technology trends in education: Seven years of forecasts and convergence. *Computers & Education* 57(3), 1893-1906.
- [20] Ceyhan, A. (2008). Predictors of Problematic Internet Use on Turkish University students. *Cyberpsychology Behavior and Social Networking* 11(3), 363-366.
- [21] Fernández, S. (2003). *Las tecnologías de la información y las comunicaciones en el sistema universitario español*. CRUE.
- [22] Ghafournia, N. (2013). The relationship between using multiple-choice test-taking strategies and general language proficiency level. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 70, 90-94.
- [23] Corporación Universitaria Americana (2016). *Formación por Procesos Autorregulativos -FPA- Modelo Pedagógico*. Coruniamericana.
- [24] Agarwal, N. & Rathod, U. (2006). Defining 'sucess' for software projects: An exploratory revelation. *International Journal of Project Management* 24(4), 358-370.
- [25] Heno, C. ET AL. (2017). Multidisciplinariedad, interdisciplinariedad y transdisciplinariedad en la formación para la investigación en ingeniería. *Revista Lasallista de Investigación* 14(1), 179-197.
- [26] Beneitone, P. ET AL. (2007). Reflexiones y perspectivas de la Educación Superior en América Latina. Informe Final - Proyecto Tuning - América Latina 2004-2007. Tuning Project.
- [27] <http://www.abet.org/>

# Desarrollo de un laboratorio virtual para el proceso de producción de microalgas: Caso spirulina platensis

Kainer D. Nassif A.<sup>1</sup>

Mauricio A. Villalba<sup>2</sup>

Hugo F. Lobaton<sup>3</sup>

Universitaria Agustiniiana – Uniagustiniana  
Bogotá – Colombia

Los laboratorios virtuales se han mostrado como herramientas educativas eficaces para la capacitación en procesos a estudiantes de ingeniería, ingenieros y operadores de plantas. Estos proporcionan un método fácil de usar para llevar a cabo experimentos que se soportan sobre modelos matemáticos. En el momento de establecer un cultivo comercial de *Spirulina platensis* ya sea para producir biomasa o para extraer sus metabolitos, es necesario conocer como diferentes variables tales como irradiación solar, variación en la concentración de nutrientes, pH, temperatura, etc, afectan la productividad y calidad del producto. En el campo del cultivo de microalgas, se ha propuesto como uno de los ejes centrales para la masificación del cultivo de estos microorganismos, el uso de las tecnologías de la información. En este trabajo se desarrolló una metodología para crear un laboratorio virtual del modelo matemático propuesto por [1] para el cultivo de esta microalga. Este modelo está conformado por 5 ecuaciones diferenciales y 6 ecuaciones ordinarias. La metodología propuesta para el desarrollo de este laboratorio virtual fue documentada y puede servir en el desarrollo de otros laboratorios virtuales basados en modelos matemáticos que se usen para la enseñanza en la ingeniería de procesos.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Laboratorios virtuales

La experimentación juega un papel esencial en la ingeniería y en la educación científica. Mientras que los laboratorios tradicionales ofrecen oportunidades a los estudiantes de experimentar con sistemas reales, estos implican altos costos en equipos, espacio y personal de mantenimiento [2]. Por lo tanto, existe una creciente popularidad en el uso de laboratorios virtuales debido a su destacada ventaja, como lo es la intuición e interactividad entre la enseñanza y el aprendizaje. Se ha comprobado que la interactividad de los laboratorios virtuales anima a los estudiantes a desempeñar un papel más activo y esto interviene de una mejor manera en su proceso de aprendizaje [2]. Una investigación, en la que se desarrolló un laboratorio virtual, mostro que el 93% de los estudiantes consideran los laboratorios virtuales como una herramienta útil [2]. El uso de aulas virtuales ha sido propuesto por varios autores [2]–[4] y estos se componen de:

- La simulación del modelo matemático que describe las propiedades relevantes del sistema.
- La interfaz interactiva de usuario a modelo, denominada virtual-lab; en éste, cualquier cambio en la variable de entrada es automáticamente mostrada en la interfaz gráfica. Y, recíprocamente, cualquier interacción del usuario con ésta, modifica automáticamente la variable en el modelo.
- (3) Una narrativa que proporciona información sobre el sistema y el uso del laboratorio virtual.

### 1.2 Cultivo de Spirulina

En el marco de desarrollo de nuevos productos para la industria cosmética y agroalimentaria, la biomasa producida por microalgas se presenta como una opción debido a su variado contenido de metabolitos con diferentes propiedades funcionales para la incorporación en productos cosméticos y en alimentos funcionales. El cultivo de biomasa microalgal y el desarrollo de nuevos productos a partir de ésta, se presenta como una oportunidad para Colombia, ya que se cuenta con una gran ventaja estratégica para su cultivo, como una alta y constante irradiación solar fotosintéticamente activa, la cual es una variable primordial en el crecimiento de estos microorganismos fotosintéticos.

*Spirulina platensis* es un microorganismo fotosintético con un mercado actual de 3000 T año<sup>-1</sup> debido a su valor proteico (70%) [5]. Sin embargo, dependiendo de las condiciones de cultivo, esta microalga es capaz de producir otros metabolitos con alto valor agregado. Por ejemplo, la ficocianina, un pigmento presente en la biomasa de *Spirulina* ha despertado el interés en la industria cosmética y alimentaria mundial debido a su brillante color azul y potentes capacidades antioxidantes para ser usado como colorante natural [6]. Otros compuestos de valioso interés son: el ácido gama-linoleico, un ácido graso insaturado esencial, y el Calcio-Spirulan, un polisacárido con actividades anti-virales y anti-bacterianas promisorias [7]. *Spirulina platensis* puede ser cultivada en estanques tipo raceways (Figura

---

<sup>1</sup> kainer.nassifa@uniagustiniana.edu.co

<sup>2</sup> mauricio.villalba@uniagustiniana.edu.co

<sup>3</sup> hugo.lobaton@uniagustiniana.edu.co



1 B) o en fotobioreactores (Figura 1 A). Estos últimos son más empleados para llevar a cabo experimentos, mientras que los estanques tipo raceways son más usados comercialmente [8].

Diferentes estrategias se han propuesto como posibles formas para mejorar la factibilidad económica del cultivo de microalgas, una de estas es el uso de las tecnologías de la información como, laboratorios virtuales, instalación de sensores remotos o desarrollo de aplicaciones de celular que asistan en el diagnóstico del cultivo de estos microorganismos [6]. Este proyecto propone el desarrollo de un laboratorio virtual, el cual será basado en el modelo matemático propuesto a continuación.



a) Estanques tipo raceway                      b) Fotobioreactor tipo columna de burbujeo [9]

**Figura 1.** Sistemas empleados para el cultivo de microalgas

## 2. MÉTODO

### 2.1 Modelo matemático

En esta sección primero se especifican las condiciones de entrada y salida del modelo, así como los parámetros de diseño para luego describir las ecuaciones diferenciales y auxiliares con sus respectivas constantes.

1. *Condiciones de entrada del modelo.* Las condiciones de entrada llamadas  $y0[]$  presentes en la Tabla 1, son las condiciones iniciales usadas para resolver las cinco ecuaciones diferenciales propuestas más adelante. Los parámetros llamados P son condiciones de entrada adicionales que son usadas tanto en las ecuaciones diferenciales como en las ecuaciones auxiliares.

**Tabla 1.** Condiciones iniciales y adicionales usadas en el modelo

Constante	Definición	Nomenclatura usada en el modelo
$X_0$ (g l <sup>-1</sup> )	Biomasa inicial	$y0[0]$
$Z_{pco}$ (g l <sup>-1</sup> )	Ficocianina inicial	$y0[1]$
$B_0$ (g l <sup>-1</sup> )	Bicarbonato inicial	$y0[2]$
$CO_2$	$CO_2$ inicial en el medio	$y0[3]$
$N_0$ (g l <sup>-1</sup> )	Nitrato inicial	$y0[4]$
P	Presión total	P1
$CO_{2inlet}$ (%)	% $CO_2$ inicial en el gas	P2
$I_s$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Intensidad lumínica inicial	P3
R (m)	Profundidad de raceway (0.01 hasta 1)	P4
Q (l m <sup>-1</sup> )	Flujo volumétrico del gas	P5
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	Área del sistema productivo	P6
$v$ (m s <sup>-1</sup> )	Velocidad generada por la rueda de paletas (0.5 m/s)	P7

La Tabla 2 muestra los parámetros de diseño de los sistemas de producción, que también se pueden manipular en el laboratorio virtual.

**Tabla 2.** Condiciones de diseño

Constante	Definición
Dimensiones del raceway	Pequeña (37.5 m <sup>2</sup> ): 15 x 2.5 x 0.03 = 1 mt <sup>3</sup>
	Jonathan-Mediana (138 m <sup>2</sup> ): 23 x 6 x 0.075 = 10 mt <sup>3</sup>
	Argentina-Grande 1(500 m <sup>2</sup> ): 50 x 10 x 0.7 = 350 mt <sup>3</sup>
	Klein-Grande 2 (450 m <sup>2</sup> ): 45 x 10 x 0.3 = 135 mt <sup>3</sup>
	Ecuador-Grande 3 (1000 m <sup>2</sup> ): 1000 x 10 x 0.03 = 300 mt <sup>3</sup>
V (m <sup>3</sup> )	Volumen efectivo de producción
$X_T$ (kg)	Biomasa total a producir por lote de producción

- *Condiciones de salida del modelo.* Una vez resuelto el modelo, éste genera gráficas con respecto al tiempo de las siguientes variables especiadas en la Tabla 3.
- *Ecuaciones diferenciales.* La ecuación (1) describe el cambio de la biomasa de Spirulina en el tiempo y la ecuación (2) el cambio de la ficocianina en el tiempo. Ambas son descritas con una cinética tipo Monod. Las

ecuaciones (3), (4) y (5) describen el cambio de los nutrientes (bicarbonato, dióxido de carbono y nitrato en el tiempo). Todas las constantes usadas en el modelo (Tabla 4) se encontraron experimentalmente o se obtuvieron de la literatura.

**Tabla 3.** Condiciones de salida

Constante	Definición
$I$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Atenuación de la Intensidad lumínica en el cultivo
$b$ (g l <sup>-1</sup> )	Evolución del Bicarbonato
$x$ (g l <sup>-1</sup> )	Evolución de la Biomasa
$n$ (g l <sup>-1</sup> )	Evolución del Nitrato
$c$ (g l <sup>-1</sup> )	Evolución del dióxido de carbono en el medio
$Z_{pc}$ (g l <sup>-1</sup> )	Evolución de la Ficocianina
pH	Evolución del pH

$$\frac{dx}{dt} = \mu_{\max} \times \left( \frac{I}{I + K_i + \frac{I^2}{K_{ip}}} \times \frac{b}{b + K_b} \times \frac{n}{n + K_n} + \frac{Z_{pc}}{Z_{pc} + K_{pc}} \times \frac{K_n}{n + K_n} \right) \times x \quad (1)$$

$$\frac{dz_{pc}}{dt} = R_{pc} \times \left( \frac{K_{li}}{I + K_{li}} - \left( \frac{I}{I + K_{li}} + \frac{Kn}{n + K_n} + \frac{K_b}{b + K_b} \right) \right) \times z_{pc} \quad (2)$$

$$\therefore \frac{db}{dt} = \frac{dc}{dt} - y_b \times \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dc}{dt} = kla \times \left( \frac{P \times C_{CO_2}}{H_{CO_2}} - c \right) \quad (4)$$

$$\frac{dn}{dt} = -Y_n \times \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

- *Ecuaciones lineales auxiliares.* Las ecuaciones (6) a (11) lineales mencionadas a continuación son auxiliares y alimentan el modelo principal de ecuaciones diferenciales.

$$I(r, t) = I_s \times \frac{1}{R} \times \frac{2 * \cos h \left( \delta \times \frac{r}{R} \right)}{\cos h(\delta) + \alpha \times \sin h(\delta)} \quad (6)$$

$$\alpha = \left[ \frac{E_a * (Z_{pc} + 0.009)}{(E_a * (Z_{pc} + 0.009) \times + E_s)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\delta = [E_a * (Z_{pc} + 0.009) + E_s] \times x \times \alpha \times R \quad (8)$$

$$kla = 0.467 \times vg^{0.88} \quad (9)$$

$$vg = \frac{Q}{A_{cs}} \quad (10)$$

$$pH = pk + \log \left( \frac{[b]}{[c]} \right) \quad (11)$$

Este modelo está compuesto por condiciones de entrada y parámetros, constantes y ecuaciones diferenciales y auxiliares que fueron inicialmente resueltas en Matlab y validadas con datos experimentales. Los resultados de la validación se pueden encontrar en el siguiente trabajo [1]. En este trabajo, las ecuaciones diferenciales fueron resueltas usando el método Runge-Kutta de cuarto orden, el cual fue incorporado en la plataforma JAVA.

**Tabla 4.** Constantes del modelo

Constante	Definición	Valor	Nomenclatura usada en el modelo
$\mu_{\max}$ (h <sup>-1</sup> )	Velocidad específica de crecimiento	0.0693	K1
$K_i$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Constante de saturación por luz tipo Monod	200	K2
$K_{ip}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Constante de inhibición por luz	800	K3
$K_b$ (g l <sup>-1</sup> )	Constante de saturación por bicarbonato tipo Monod	$8 \times 10^{-3}$	K4
$K_n$ (g l <sup>-1</sup> )	Constante de saturación por nitrato tipo Monod	$4 \times 10^{-3}$	K5
$K_{pc}$ (g l <sup>-1</sup> )	Constante de saturación por ficocianina tipo Monod	0.12	K6
$K_{li}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Constante de saturación por luz tipo Monod para ficocianina	90	K7
$R_{pc}$	Velocidad de formación de ficocianina	0.02	K8
$Y_n$ (g gbiomasa <sup>-1</sup> )	Contante de consumo de nitrato	0.5	K9
$Y_b$ (g gbiomasa <sup>-1</sup> )	Contante de consumo de bicarbonato	2.8	K10
$E_a$ (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> antena)	Coefficiente de absorción	1300	K11
$E_s$ (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> Biomasa)	Coefficiente de dispersión	200	K12
$H_{CO_2}$	Constante de Henry	3412	K13

## 2.2 Desarrollo del laboratorio virtual

Los elementos básicos en el desarrollo del software de acuerdo a los lineamientos encontrados en la literatura para laboratorios virtuales fueron: graficas descriptivas de cada uno de los distintos valores de resultado, información básica de los elementos físicos necesarios para el proceso de microalgas (con su respectiva imagen), información detallada de los elementos y variables que afectan con el progreso de estos cultivos. En el proceso de desarrollo se presentaron dos pre-diseños de interfaces gráficas, que fueron evaluados con el fin de agregar o eliminar componentes; estableciendo de qué manera se usarían para un óptimo rendimiento con el usuario como lo son, cajas de texto, barras de medición, botones, paneles de espacios y colores.

El diseño final (Incluyendo cambios, actualizaciones, entre otros), se basó en los principios de diseño planteados por Jason Beaird [10] que incluyen Maquetación y composición y teórica del color entre otros aspectos. Además de esto, se utilizaron los planteamientos para generar un diseño de interfaz centrado en el usuario y su aplicación CONOPS [11] y se incluyó el modelado de navegación centrado en el uso [12]. La tecnología de Drag and Drop (Arrastrar y Soltar) así como las nuevas tendencias de entornos gráficos presentan escenarios diversos permitiendo la ubicación de los contenidos propuestos en el laboratorio virtual. Donde esas características propuestas, se evalúa desde la perspectiva del usuario teniendo un mayor énfasis en los requerimientos iniciales, centrado en la viabilidad y factibilidad del software. El desarrollo del laboratorio virtual se llevó a cabo mediante la tecnología Java 8, el cual nos permite realizar ejecuciones sobre la misma plataforma JDK (Java Developer Kit). Esta establece un espacio de memoria para la ejecución y compilación de los códigos necesarios para un desarrollo óptimo del laboratorio virtual. Adicionalmente, esta herramienta trae componentes necesarios como NetBeans versión 8.2 (Editor de líneas para Java), JavaFx Scane Builder versión 2.0 (Entorno grafico en Java), JFoenix la cual brinda nuevas y mejores estructuras y campos para la interacción del Usuario.

El modelo descrito en la sección 3 fue resuelto mediante las clases instanciadas propuestas en el libro de [13]. Estas resuelven un sistema de ecuaciones diferenciales por medio del método de Runge-Kutta de cuarto grado en java. Sin embargo, estas clases deben ser adaptadas a cada problema en particular. Por lo tanto, fueron analizadas línea a línea y contrastadas con el método numérico de Runge-Kutta descrito en [13] con el fin de interpretar las instrucciones en el código y poder adaptarlas al modelo propuesto en este trabajo. Para la resolución de una ecuación diferencial  $\frac{dx}{dt} = f(t, x)$  con condición inicial  $x(0) = x_0$ . La solución por Runge-Kutta se muestra en las ecuaciones (12) a (16).

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{6} \times (a + 2b + 2c + d) \quad (12)$$

$$a = f(t_n, x_n) \quad (13)$$

$$b = f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2} \times a\right) \quad (14)$$

$$c = f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2} \times b\right) \quad (15)$$

$$d = f(t_n + h, x_n + h \times c) \quad (16)$$

Para ejecutar la simulación, comenzamos con  $x_0$  y encontramos  $x_1$  usando las fórmulas anteriores incorporadas en la clase Runge-Kutta de cuarto orden incorporada en el software. Luego incorporamos a  $x_1$  para encontrar  $x_2$  y así sucesivamente. Como es un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas las 5 ecuaciones diferenciales propuestas en este trabajo son resueltas simultáneamente.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la interfaz final. En esta podemos encontrar en la sección de menú, las condiciones iniciales que el usuario podrá manipular. Estas se encuentran agrupadas por categorías: radiación, temperatura, medio de cultivo, características del fotobioreactor y constantes del modelo, las cuales estarán disponibles solo para usuarios avanzados. La Figura 3 muestra un ejemplo del despliegue del sub-menú, medio de cultivo, donde el usuario definirá las concentraciones del medio de cultivo (es importante señalar que estas serán las condiciones de entrada para el modelo matemático). Después de que el usuario ajuste todas las condiciones iniciales se procede a llevar a cabo la simulación (resolución del sistema de ecuaciones diferenciales).

La Figura 4 muestra la metodología general utilizada en este trabajo para el desarrollo del laboratorio virtual. Como se visualiza el corazón del programa es el método numérico para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales. Este sistema normalmente describe un fenómeno físico. Por lo tanto, esta metodología se puede utilizar para el desarrollo de laboratorios virtuales en el área de procesos, ejemplo; para simular intercambiadores de calor, torres de destilación, procesos de secado, etc. Todas estas operaciones unitarias usan equipos costosos para llevar a cabo prácticas experimentales, pero también todas ellas se pueden describir con sistemas de ecuaciones. Por lo tanto, se pueden desarrollar laboratorios virtuales de éstas que ayudarían en el proceso de enseñanza en las áreas de ingeniería

química, agroindustrial y alimentos. Por ejemplo, India posee una red de laboratorios virtuales (<http://vlab.co.in/>) para varias disciplinas. Uno de los objetivos de este programa es entrenar para el uso de equipos costosos, que normalmente no están disponibles para un número de estudiantes debido a limitaciones de tiempo y distancia geográfica.



Figura 2. Interfaz gráfica del laboratorio virtual para el proceso de producción de Spirulina

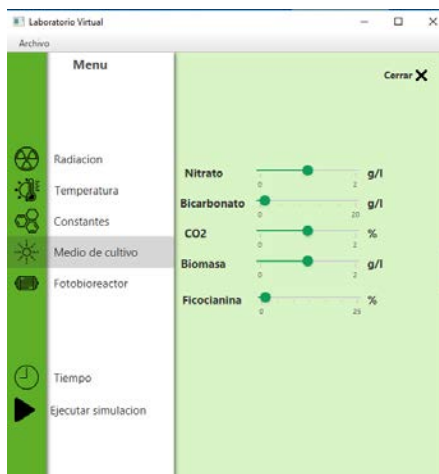


Figura 3. Agrupación de las condiciones iniciales y de diseño. Ejemplo de despliegue de sub-menú cuando el usuario sitúa el cursor sobre medio de cultivo

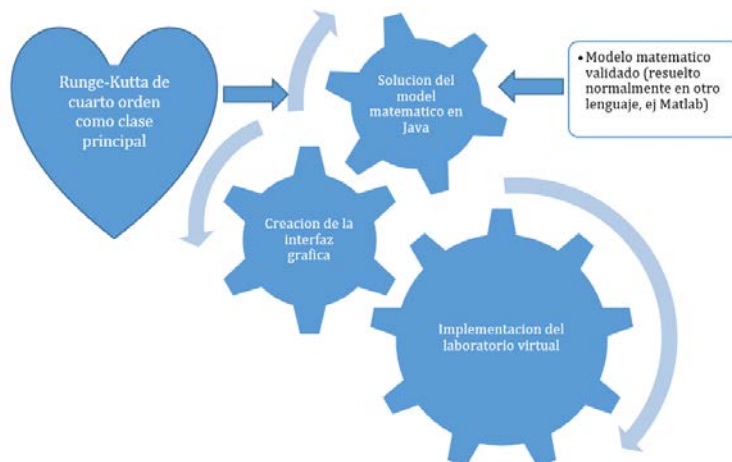


Figura 4. Metodología para el desarrollo de un laboratorio virtual que involucra ecuaciones diferenciales

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran el desarrollo de un laboratorio virtual aplicado al cultivo de microalgas. La metodología desarrollada en el numeral 3 puede servir para el desarrollo de cualquier laboratorio virtual en el área de ingeniería de procesos donde se requiera la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas y el desarrollo de una interfaz gráfica conectada con el modelo matemático. El software elaborado en este proyecto será implementado en clases de ingeniería de bioprocesos para explicar cómo diferentes variables afectan el proceso de producción de la microalga Spirulina.

## REFERENCIAS

- [1] Lobaton, H. (2017). Mathematical modelling as a research tool in the cyanobacteria cultivation. Tesis de Doctorado. Universidad de Erlangen-Núremberg.
- [2] Heradio, R. et al. (2016). Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers & Education* 98, 14–38.
- [3] Villalba, M., Urquia, A. & Dormido, S. (2008). Object-oriented modelling of virtual-labs for education in chemical process control. *Computers & Chemical Engineering* 32(12), 3176–3186.
- [4] Dominguez, L. et al. (2010). Virtual laboratories in (bio)chemical engineering education. *Education for Chemical Engineers* 5(2), pp. e22–e27.
- [5] Pulz, O. & Gross, W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 65(6), 635–648.
- [6] Chen, Y. et al. (2013). Engineering strategies for simultaneous enhancement of C-phycoyanin production and CO<sub>2</sub> fixation with *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology* 145, 307–312.
- [7] Pulz, O. & Sandau, P. (2009). Untersuchungen zu bioaktiven Wirkungen des Algenpolysaccharids Calcium-Spirulan aus *Arthrospira platensis*. Tesis de doctorado. IGV GmbH.
- [8] Soni, R., Sudhakar, K. & Rana, S. (2017). Spirulina - From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology* 69, 157–171.
- [9] Lobaton, H., Schwerna, P. & Buchholz, R. (2017). Coproducción de ficocianina y exopolisacáridos en el cultivo de *Arthrospira platensis*. *Idesia (Arica)* 35, 79–86.
- [10] Beard, J. (2007). [The Principles of Beautiful Web Design](#). Online [Feb 2018].
- [11] Korfiatis, P., Zigh, T. & Blackburn, M. (2012). Developing a graphical CONOPS to enhance model-based systems engineering. In: IIE Annual Conference and Expo.
- [12] Constantine, L. (2003). Canonical abstract prototypes for abstract visual and interaction design. *Lecture Notes in Computer Science* 2844, 1–15.
- [13] Coban, T. (2005). [Numerical Analysis with Java examples](#). Online [Feb 2018].

# Determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de la aleación Al-14%Cu mediante un método alternativo de análisis térmico asistido por computador

Carlos González R.<sup>1</sup>

Carla Aguilar M.<sup>2</sup>

Anthony A. Harrup G.<sup>3</sup>

Universidad Autónoma de México

Ciudad de México – México

Este trabajo presenta el desarrollo y validación de un nuevo método de análisis de curvas de enfriamiento para determinar el calor latente de fusión y la evolución de la fracción sólida en aleaciones metálicas inicialmente líquidas enfriadas dentro de moldes metálicos, usando las lecturas de las curvas de enfriamiento de la muestra y del molde. El método se basa en la solución numérica de las ecuaciones de conservación de energía, suponiendo el enfriamiento newtoniano de un sistema hipotético compuesto de la muestra y el molde metálico. Una versión simplificada de este método también se presenta y valida. Para validar estos métodos, ambos se aplican al procesamiento numérico de curvas de enfriamiento experimentales triplicadas de una aleación Al-14% de Cu. Las predicciones de estos métodos se comparan con las predicciones de otros dos métodos de análisis de curvas de enfriamiento y con valores de calor latente reportados en la literatura. Los resultados obtenidos sugieren que el nuevo método y su versión simplificada predicen entalpías de solidificación notablemente más cercanas a los valores de referencia, que los obtenidos empleando métodos convencionales y que todos los métodos aplicados en este trabajo predicen evoluciones de fracciones solidas similares.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha incrementado el uso del análisis de curvas de enfriamiento como una herramienta en línea para controlar la calidad metalúrgica de diferentes aleaciones de interés comercial. El análisis de curvas de enfriamiento se usa comúnmente para controlar la refinación de grano y la modificación del eutéctico en aleaciones base Al-Si, y en el caso del hierro colado se usa para controlar carbono equivalente, inoculación y morfología de grafito [1-3] y se están desarrollando aplicaciones potenciales para otros sistemas de aleación [4].

El análisis de las curvas de enfriamiento también se ha utilizado para el estudio y la caracterización de la solidificación. Por ejemplo, se ha utilizado junto con otras técnicas analíticas tales como difracción de rayos X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, para estudiar la ruta de solidificación de varias aleaciones, incluida la determinación de entalpías de fusión y la evolución de la fracción sólida como una función de la temperatura bajo diferentes condiciones de velocidad de enfriamiento [5-7]. Estos últimos datos son particularmente importantes para simular, mediante software especializado, la solidificación de aleaciones de interés industrial, las cuales son de naturaleza multicomponente y cuya solidificación no puede predecirse adecuadamente utilizando métodos convencionales. Lo anterior se ha implementado a través de los Métodos de Análisis de Curvas de Enfriamiento Asistido por Computadora (Computer Aided Cooling Curve Analysis, CA-CCA por sus siglas en inglés), de los cuales los más conocidos son los métodos Newtonianos o de análisis térmico de Newton (NTA) [8] y el método de Fourier (FTA) [9].

En vista de su mayor simplicidad y facilidad de aplicación, el método NTA original [8], despertó interés en desarrollar nuevos métodos que, basados en la lectura de un solo termopar, pudieran proporcionar información más precisa y confiable con respecto a los calores latentes y la evolución de la fracción sólida asociada al enfriamiento y solidificación de metales y aleaciones. Todos estos métodos se basan en la suposición de la ausencia de gradientes térmicos dentro de la muestra y en un balance integral de energía y se han denominado en su conjunto como métodos newtonianos.

Los métodos newtonianos pueden clasificarse en dos categorías. La primera categoría la constituyen los métodos basados en la generación de una curva de referencia cero y la integración, durante la solidificación, del área que existe entre la primera derivada y la curva cero, como por ejemplo el método de Newton de línea base lineal (NBL) [10] y el método de Newton de línea base dinámica, (DBL) [11], llamados métodos de primera generación. Los métodos de segunda generación están caracterizados porque no usan curva de referencia cero y se basan en la solución numérica o analítica de la ecuación de conservación de energía, como, por ejemplo, el método Newtoniano basado en ecuaciones (EBN) [12] y el método analítico de fracción sólida (AS-SFM) [13], métodos que pueden clasificarse como métodos de segunda generación. Es interesante observar que los métodos de segunda generación surgieron de la propuesta de Gibbs et al. quienes propusieron el método EBN [12] en un intento de hacer un tratamiento más racional de las curvas de enfriamiento, ya que la principal crítica hecha a los métodos de primera generación es la naturaleza arbitraria de la curva cero de referencia.

---

<sup>1</sup> carlosgr@unam.mx

<sup>2</sup> carlaaguilar121@gmail.com

<sup>3</sup> aaharrupg@gmail.com

Con respecto a las predicciones de calor latente, uno de los principales problemas mostrados por todos los métodos mencionados es que predicen valores de entalpía de solidificación muy alejados de los valores determinados por la técnica de referencia que es la calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry (DSC)). Las discrepancias observadas pueden estar relacionadas con la naturaleza arbitraria de las curvas cero de referencia, en el caso de los métodos de primera generación y también pueden surgir discrepancias porque en ninguno de los métodos mencionados se toma en cuenta el papel térmico del molde durante los procesamientos numéricos aplicados a las curvas de enfriamiento.

En un trabajo reciente, Erbas [14] ha propuesto un método que tiene en cuenta la presencia térmica del molde en el proceso de enfriamiento de una muestra metálica y ha obtenido resultados que sugieren que teniendo en cuenta la presencia del molde en el procesamiento numérico de la curva de enfriamiento de la muestra, se logra una mejor aproximación en los valores predichos de calor latente de fusión de los cuatro metales puros que analizó.

Para tomar en cuenta el papel de la presencia del molde dentro de la cinética de enfriamiento de la muestra metálica contenida en él, González et al. [15] propusieron un nuevo método, denominado Método de Balance de Energía Metal / Molde (MEM). Este método se basa en la resolución numérica de la ecuación de conservación de energía de un sistema hipotético compuesto metal / molde, tratando con esto de tener en cuenta el papel térmico del molde en el proceso de enfriamiento de la muestra. El método MEM utiliza las lecturas de dos termopares, uno ubicado dentro de la muestra y otro dentro del molde, para predecir el calor latente y la evolución de la fracción sólida de la muestra. Este método se aplicó a determinaciones preliminares de muestras de zinc puro y estaño líquido que se enfrían y se solidifican en moldes de acero inoxidable, mostrando resultados prometedores. Los mismos autores han presentado una versión simplificada de este método [16], el Método Simplificado de Balance de Energía Metal / Molde (MSEM), que proporciona, aparentemente, buenos resultados con metales puros sin la necesidad de medir la evolución de la temperatura del molde, pero tomando en cuenta el peso del molde y su capacidad calorífica.

El propósito de este trabajo es aplicar el método MEM [15] y su versión simplificada MSEM [16] para determinar el calor de latente de fusión y la evolución de la fracción sólida en función de la temperatura de una aleación Al-14% Cu, así como comparar sus predicciones con los valores de calor latente reportados en la literatura y con las determinaciones obtenidas empleando los métodos convencionales NBL [10] y DBL [11].

## 2. MÉTODO

El método propuesto por González et al. [15] ha sido denominado Método de Balance de Energía Metal / Molde (MEM) y analiza el proceso de enfriamiento de una muestra metálica de peso conocido, inicialmente líquida, que está contenida en un molde metálico cilíndrico de peso conocido, térmicamente aislado en su tapa y en su base. El método supone que en el sistema compuesto metal/ molde, tanto el molde metálico como el metal comienzan su proceso de enfriamiento al mismo tiempo y de manera conjunta, y cuando no hay transformación de fase, el enfriamiento sigue un comportamiento newtoniano que puede describirse mediante la ecuación (1).

$$m_M C_{pM} \frac{dT}{dt_M} + m_{mo} C_{p_{mo}} \frac{dT}{dt_{mo}} = -C_f * (T_M - T_0) \quad (1)$$

En la ecuación (1)  $m$  es el peso (Kg),  $C_p$  (J/KgK) es la capacidad calorífica y  $dT / dt$  (K/s) es la velocidad de enfriamiento, usando el subíndice  $M$  para el metal y  $mo$  para el molde,  $C_f$  (W/K) es el factor de enfriamiento, un coeficiente de enfriamiento cinético térmico que describe el enfriamiento del sistema compuesto,  $T_M$  (K) es la temperatura del metal y  $T_0$  (K) es la temperatura ambiente. La ecuación (1) asume que el sistema formado por la muestra metálica y el molde cambian sus entalpías como resultado de un flujo de calor transferido a su entorno durante su enfriamiento a una velocidad de enfriamiento dada. El factor de enfriamiento  $C_f$  es un coeficiente de enfriamiento cinético que incluye la inversa de la resistencia térmica global en todo el sistema metal-molde-medio circundante y tiene en cuenta todas las resistencias térmicas presentes en el proceso de transferencia de calor de la muestra y del molde a su entorno, incluido el resquicio de aire entre la muestra y el molde que eventualmente se forma, la pintura refractaria que cubre al molde en sus superficies internas y externas, la resistencia térmica de la pared del molde metálico y la resistencia térmica asociada con la transferencia de calor por radiación combinada con convección desde la pared exterior del molde al medio circundante. Teniendo en cuenta que todas las resistencias térmicas mencionadas se ven afectadas por la temperatura, se supone que el parámetro  $C_f$  depende de la temperatura y para describir cuantitativamente el proceso de enfriamiento del sistema compuesto metal / molde en estudio es necesario obtener ecuaciones numéricas describiendo esta dependencia.

$C_f$  puede estimarse numéricamente en un paso de tiempo  $\Delta t$  a partir de la ecuación (2) e información experimental sobre la muestra metálica y el molde durante el proceso de enfriamiento cuando la muestra está completamente líquida o sólida (es decir, sin cambio de fase).

$$\frac{m_M C_{pM} \Delta T_M + m_{mo} C_{p_{mo}} \Delta T_{mo}}{-(T_M - T_0) \Delta t} = C_f \quad (2)$$

Entonces, utilizando los datos disponibles experimentalmente, que incluyen los pesos y las curvas de enfriamiento del metal y el molde, la temperatura ambiente  $T_0$  y los valores seleccionados para las capacidades caloríficas del metal

y del molde, es posible la generación de valores para el coeficiente de enfriamiento cinético Cf del sistema en estudio, en función de la temperatura. Se pueden obtener ecuaciones que describen cómo cambia este parámetro en función de la temperatura mediante el ajuste numérico de esta información. La disponibilidad de tales correlaciones permite obtener el calor latente de solidificación y la evolución de la fracción sólida mediante la integración numérica del calor latente instantáneo liberado por la muestra durante la solidificación, obtenido a partir del correspondiente balance de energía.

La metodología para el procesamiento numérico de la curva de enfriamiento por el método MEM comienza con la determinación de la dependencia numérica del parámetro cinético térmico Cf en función de la temperatura. Para saber qué partes de la curva de enfriamiento se utilizarán para obtener Cf, se identifican en la primera derivada de la curva de enfriamiento del metal los tiempos de inicio y de fin de la solidificación,  $t_{is}$  y  $t_{fs}$  respectivamente utilizando los criterios convencionales utilizados por el método NTA [4]. De esta forma, las curvas de enfriamiento de la muestra y del molde se dividen en tres secciones secuenciales: enfriamiento del líquido, la solidificación y enfriamiento del sólido. Las secciones de las curvas de enfriamiento asociadas con enfriamiento del líquido y del sólido se procesan numéricamente para obtener Cf usando la ecuación (2) y Cf se grafica en función de la temperatura para obtener, mediante ajuste numérico una ecuación que describa cuantitativamente cómo cambia este parámetro como función de la temperatura de la muestra.

Durante la solidificación de la muestra, es decir, entre  $t_{is}$  y  $t_{fs}$ , el balance de energía se describe mediante la ecuación (3) donde Hf es el calor latente de fusión (J / Kg) y Fs es la fracción sólida:

$$m_M C p_M \frac{dT}{dt} + m_{mo} C p_{mo} \frac{dT}{dt} = -Cf(T_M - T_o) + m_M H_f \frac{dF_s}{dt} \quad (3)$$

En un paso de tiempo  $\Delta t$ , el balance de energía puede ser descrito por:

$$m_M C p_M \Delta T_M = -Cf(T_M - T_o)\Delta t - m_{mo} C p_{mo} \Delta T_{mo} + m_M H_f \Delta F_s \quad (4)$$

Usando un esquema de integración de Euler, el balance de la ecuación (4) puede escribirse como:

$$m_M C p_M (T_M^{t+\Delta t} - T^t) = -Cf(T_M^{t+\Delta t} - T_o)\Delta t - m_{mo} C p_{mo} (T_{mo}^{t+\Delta t} - T_{mo}^t) + m_M H_f (F_s^{t+\Delta t} - F_s^t) \quad (5)$$

En la ecuación (5) los superíndices t y t +  $\Delta t$  indican el valor anterior y el valor actual, respectivamente de las variables correspondientes temperatura T y fracción sólida Fs. El calor latente instantáneo liberado por la muestra  $Q_{Linst}$  (J) está dado por la ecuación (6).

$$Q_{Linst} = -m_M H_f (F_s^{t+\Delta t} - F_s^t) = -Cf(T_M^{t+\Delta t} - T_o)\Delta t - m_{mo} C p_{mo} (T_{mo}^{t+\Delta t} - T_{mo}^t) - m_M C p_M (T_M^{t+\Delta t} - T_M^t) \quad (6)$$

Y el calor latente de solidificación del metal Hf (J / kg) se puede obtener a partir de la ecuación (7), donde  $Q_{Ltot}$  (J) es el calor total liberado durante la solidificación y  $t_{is}$  y  $t_{fs}$  son los tiempos de inicio y fin de la solidificación:

$$\Delta H_f = \frac{Q_{Ltot}}{m_M} = \frac{1}{m_M} \sum_{t_{is}}^{t_{fs}} Q_{Linst} \quad (7)$$

La fracción sólida formada, durante la solidificación, en el tiempo t puede obtenerse de la ecuación (8).

$$F_s^t = \frac{1}{\Delta H_f * m_M} \sum_{t_{is}}^t Q_{Linst} \quad (8)$$

Debe mencionarse que la obtención de la curva de enfriamiento del molde no es fácil de implementar experimentalmente por lo cual, como resultado de los hallazgos experimentales que muestran que las velocidades de enfriamiento del molde y el metal son casi iguales durante su proceso de enfriamiento sin cambio de fase, se desarrolló una versión simplificada del método lo que permite proponer un procedimiento simplificado que solo necesita de disponer de la curva de enfriamiento de la muestra en estudio y del peso y la capacidad calorífica del molde.

En su versión simplificada, que llamamos Método Simplificado de Balance de Energía Metal / Molde (MSEM) se supone que las velocidades de enfriamiento del molde metálico y la muestra son las mismas y por lo que la ecuación (1), en ausencia de transformación de fase puede ser escrita con la ecuación (9).

$$(m_M C p_M + m_{mo} C p_{mo}) \frac{dT}{dt} = -Cf * (T_M - T_o) \quad (9)$$

Y el factor de enfriamiento Cf se puede obtener con la ecuación (10).

$$\frac{(m_M C p_M + m_{mo} C p_{mo}) \frac{dT}{dt}}{-(T_M - T_o)} = Cf \quad (10)$$

En consecuencia, el calor latente instantáneo liberado por la muestra puede obtenerse de la ecuación (11).

$$Q_{Linst} = -m_M H_f (F_s^{t+\Delta t} - F_s^t) = -Cf(T_M^{t+\Delta t} - T_o)\Delta t - m_{mo} C p_{mo} (T_{mo}^{t+\Delta t} - T_{mo}^t) - m_M C p_M (T_M^{t+\Delta t} - T_M^t) \quad (11)$$

Finalmente, el calor latente de solidificación y la fracción sólida pueden obtenerse de las ecuaciones (7) y (8).

Para comparar los cálculos de calor latente y de evolución de la fracción sólida predichos por MEM y MSEM, con las predicciones de otros métodos CA-CCA disponibles en la literatura, las curvas experimentales asociadas al



enfriamiento y solidificación de una aleación Al-14% en peso de Cu, se procesaron también utilizando dos métodos newtonianos diferentes: el método de Newton de línea base lineal (NBL) y el método de Newton de línea base dinámica, (DBL). Para aplicar estos métodos, los procedimientos descritos por Cetin y Kankanli, 2009 [10] y Marcwicka et al, 2011 [11] se emplearon respectivamente para el procesamiento numérico de las curvas de enfriamiento experimentales.

### 3. EXPERIMENTACIÓN

Para probar la capacidad de los métodos MEM y MSEM para determinar el calor latente y la evolución de la fracción sólida de una aleación, se eligió la aleación Al-14% de Cu por ser una de las aleaciones que ya se han estudiado en el pasado, con propiedades termofísicas conocidas y disponibles en literatura abierta y por fundir y solidificar a temperaturas inferiores a los 1000 K, lo cual permite realizar la fusión y preparación de la aleación en un crisol de SiC empleando un horno eléctrico de resistencia. Para la preparación de la aleación se partió de cargas preestablecidas de aluminio y de cobre ambos de pureza comercial. Para verificar la composición química de la aleación líquida se empleó un espectrómetro de emisión por chispa y la temperatura del baño se controló empleando un termopar tipo K hasta obtener una temperatura adecuada para la extracción de las muestras de aleación líquida. La aleación líquida fue desgasificada con argón.

Se emplearon moldes metálicos cilíndricos, de acero inoxidable 316 con 3 cm de diámetro interno, 5 cm de altura interna y un espesor de pared de 0.5 cm. Los moldes, previamente a su inmersión en el baño metálico para la extracción de las muestras, fueron cubiertos con pintura de nitruro de boro y se calentaron en otro horno hasta temperaturas superiores a la temperatura establecida para la extracción de la aleación líquida. Cada molde metálico precalentado se llenó por inmersión con aleación líquida. Luego, el molde metálico conteniendo a la muestra se colocó en un soporte diseñado para la obtención de las curvas de enfriamiento. En este soporte se aisló térmicamente al molde en su tapa y en su base empleando placas térmicamente aislantes. En este soporte, y con el fin de registrar la historia térmica del metal y el molde durante el enfriamiento, se introdujeron por su parte superior dos termopares tipo K dentro de tubos bifilares aislantes de alúmina con 0.15 cm de diámetro exterior. El primer termopar se introdujo en el eje de simetría de la muestra ubicando su punta desnuda a una profundidad correspondiente a la mitad de la altura interna del molde. El segundo termopar se introdujo perpendicular al canto de la pared lateral del molde. Los termopares fueron conectados a una tarjeta de adquisición de datos, conectada a la vez con una computadora personal portátil para recibir y almacenar las historias térmicas del metal y del molde para su posterior procesamiento numérico, utilizando los métodos propuestos en este trabajo, buscando determinar el calor latente de solidificación y la evolución de la fracción sólida de la aleación bajo estudio.

La Tabla 1 muestra los datos termofísicos utilizados durante los cálculos y el valor reportado de entalpía de fusión de la aleación bajo estudio, utilizada como referencia, y la Tabla 2 muestra los pesos de las muestras metálicas y moldes experimentales. Con el fin de comparar mejor todos los métodos de CA-CCA incluidos en este trabajo, los cálculos correspondientes a cada método se realizaron utilizando los mismos valores de capacidad calorífica durante la solidificación.

**Tabla 1.** Datos termofísicos tomados como referencia ( $\Delta H_f$ ) y utilizados durante los cálculos ( $C_{pL}$  y  $C_{pS}$ ) reportados en la literatura [17,18]. Los subíndices L y S indican aleación sólida y líquida respectivamente

Metal	$\Delta H_f$ J/kg	$C_{p_s}$ J/kgK	$C_{p_l}$ J/kgK	Ref.
Al-14%Cu	374,245	999	1082	[17]
Steel 316		456.1+0.2414T		[18]

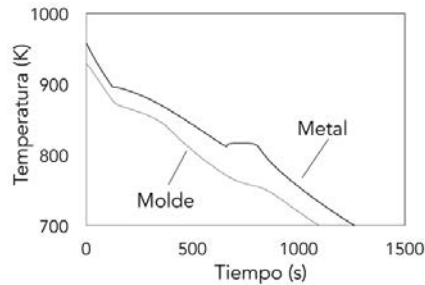
**Tabla 2.** Pesos de las muestras y de los moldes metálicos empleados en los experimentos.

Muestra	Aleación Metálica (gr)	Molde (gr.)
M1	81.2	238.2
M2	85.6	233.2
M3	82.9	243.1

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

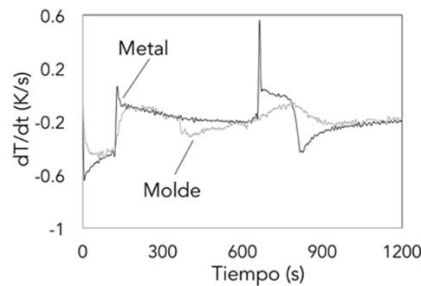
La Figura 1 muestra las curvas de enfriamiento de la aleación y del molde bajo estudio típicamente obtenidos durante la experimentación. En todos los casos, las curvas muestran cuatro etapas de enfriamiento, la primera y la última que corresponden respectivamente al enfriamiento de la aleación líquida y sólida respectivamente y las dos etapas intermedias corresponden a la solidificación. Refiriéndose a la curva de enfriamiento del metal, se observa una primera etapa de enfriamiento en el estado líquido, donde la temperatura cae continuamente hasta que se transfiere todo el calor sensible de la muestra, lo cual ocurre cuando se alcanza la temperatura de líquidos de la aleación. En este momento inicia la solidificación de la fase primaria como una segunda etapa. En esta etapa la temperatura de la aleación sigue bajando, pero a una velocidad menor hasta alcanzar la temperatura eutéctica en donde inicia una tercera etapa, que corresponde a la solidificación del eutéctico. Esta tercera etapa se caracteriza en que la temperatura de la muestra se mantiene casi constante como resultado de la liberación de calor latente de este microconstituyente.

Esta tendencia continúa hasta el final de la solidificación, cuando la liberación de calor latente termina y la temperatura del metal cae de nuevo continuamente, durante la cuarta y última etapa de enfriamiento de la muestra en estado sólido. Se puede observar que existen diferencias entre las temperaturas instantáneas del metal y el molde, pero se puede observar también una tendencia a mantener esta diferencia casi constante, durante la primera y última etapa, cuando no hay solidificación, y también se puede ver que la distancia entre curvas cambia para cada una de estas dos etapas y que, durante la solidificación del microconstituyente eutéctico la distancia entre curvas alcanza su valor más alto.



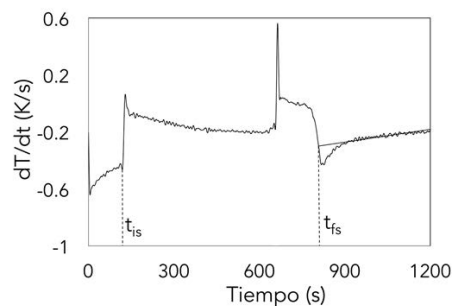
**Figura 1.** Curvas de enfriamiento típicas de la aleación Al-14%Cu y el molde durante su proceso de enfriamiento

Se encontró para los tres conjuntos metal/molde analizados que la primera derivada de la muestra y el molde eran muy similares y cercanas numéricamente, justo antes y después de la solidificación, lo que a su vez sugirió que el sistema experimental no solo sigue de cerca el comportamiento de enfriamiento asumido por la ecuación (1) pero que también podría suponerse que la velocidad de enfriamiento del metal y el molde era la misma antes y después de la solidificación. Esta observación fue el disparador detrás de la creación del método MSEM. Como ejemplo en la Figura 2 se muestra la primera derivada de las curvas de enfriamiento del molde y la muestra metálica en el caso de la muestra M1.



**Figura 2.** Primera derivada de las curvas de enfriamiento del metal y el molde durante su proceso de enfriamiento de la aleación Al-14%Cu

Para los tres conjuntos metal/molde analizados, se calculó la primera derivada de la curva de enfriamiento de la muestra con el propósito de identificar los tiempos de inicio,  $t_{is}$  y final,  $t_{fs}$  de solidificación. Estos tiempos se obtuvieron mediante la aplicación de los criterios convencionales utilizados por el método NTA [8], que identifica el inicio de la solidificación como el punto donde la primera derivada aumenta repentinamente como resultado de la liberación de calor latente y el final de la solidificación, que es ubicado en el punto donde la primera derivada durante la solidificación se cruza con la extrapolación de la tendencia mostrada por la primera derivada después de la solidificación. La Figura 3 muestra un ejemplo gráfico de esta determinación en el caso de la muestra M1.

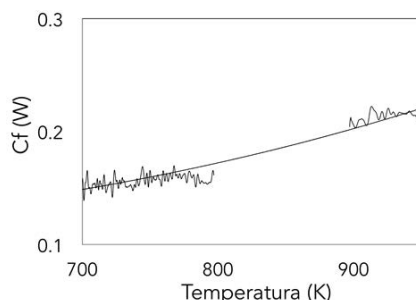


**Figura 3.** Primera derivada con respecto al tiempo de la curva de enfriamiento de la aleación Al-14%Cu y determinación gráfica de los tiempos de inicio  $t_{is}$  y finales de solidificación para muestra M1

Para los tres conjuntos metal/molde analizados, se calculó la primera derivada de la curva de enfriamiento de la muestra con el propósito de identificar los tiempos de inicio,  $t_{is}$  y final,  $t_{fs}$  de solidificación. Estos tiempos se obtuvieron mediante la aplicación de los criterios convencionales utilizados por el método NTA [8], que identifica el inicio de la solidificación como el punto donde la primera derivada aumenta repentinamente como resultado de la liberación de calor latente y el final de la solidificación, que es ubicado en el punto donde la primera derivada durante la

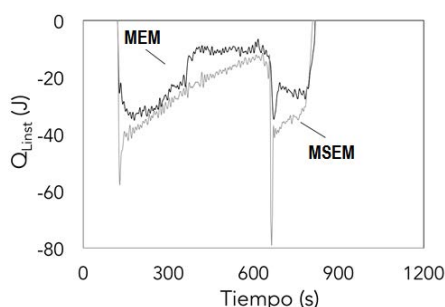
solidificación se cruza con la extrapolación de la tendencia mostrada por la primera derivada después de la solidificación.

Posteriormente, para cada conjunto metal/molde, se calculó el coeficiente de enfriamiento cinético  $C_f$  en función de la temperatura utilizando la información térmica del metal y del molde en ausencia de cambio de fase. La Figura 4 muestra los valores generados de este parámetro en función de la temperatura, que se trataron mediante ajuste numérico para obtener una ecuación de  $C_f$  en función de la temperatura para la muestra M1. Una vez que se cuenta con las expresiones de  $C_f$  en función de  $T$  el siguiente paso de la metodología fue obtener el calor latente instantáneo liberado por la muestra durante la solidificación empleando la ecuación (6) y el calor latente de solidificación, empleando la ecuación (7). En todos los cálculos, el valor de capacidad calorífica utilizado para la aleación bajo estudio fue el valor promedio de las capacidades caloríficas del líquido y el metal sólido.



**Figura 4.** La línea de ajuste numérico de los valores  $C_f$  calculados de la muestra M1 en función de la temperatura

Para el método MSEM, se aplicó la misma metodología, excepto para la determinación del coeficiente  $C_f$ , que se calculó utilizando solo la curva de enfriamiento de la muestra metálica y la ecuación (9) y la determinación instantánea del calor latente que se calculó utilizando la ecuación (10). Una vez que se conoce el calor latente de la solidificación, la evolución de la fracción sólida se puede calcular utilizando la ecuación (8). La Figura 5 muestra el calor latente instantáneo liberado como una función del tiempo típicamente calculado aplicando MEM y MSEM a las curvas experimentales de enfriamiento de la muestra M1. Se puede observar que la evolución del calor instantáneo liberado durante la solidificación predicho por ambos métodos coincide aproximadamente, aunque el método MSEM predice valores un poco mayores de calor latente liberados durante la solidificación que el método MEM.



**Figura 5.** Calor latente instantáneo liberado en función del tiempo durante la solidificación de la muestra M1

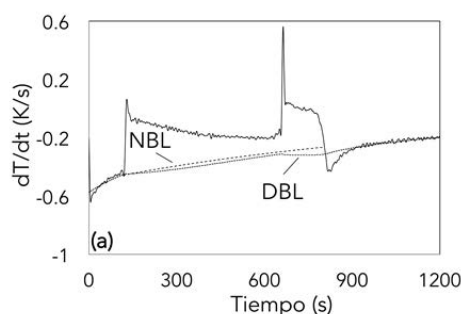
La integración de esta energía durante la solidificación proporciona el valor del calor liberado durante la transformación de fase, que dividido entre el peso de la muestra proporciona el valor determinado del calor latente de solidificación por peso unitario.

Con el fin de mostrar las diferencias típicas que existen entre los resultados predichos por los métodos MEM y MSEM para el calor latente de solidificación, los valores obtenidos para las muestras analizadas se muestran en la Tabla 3. Se puede ver que los valores obtenidos de ambos, métodos están cerca de los valores reportados en la literatura. El error de los valores de calor latente obtenidos aparentemente aumentan en el caso del método simplificado, como se esperaba, aunque podría considerarse que este aumento puede ser irrelevante cuando el objetivo es obtener fácilmente un buen valor de referencia del calor latente, teniendo en cuenta la ventaja que representa no tener que instrumentar el molde con un termopar y usar solo el peso y el  $C_p$  del molde junto con la curva de enfriamiento de la muestra metálica bajo estudio para realizar la determinación

**Tabla 3.** Valores calculados de Entalpía de fusión para las muestras experimentales utilizando los métodos MEM y MSEM.

Muestra	$\Delta H_f$ MEM	$\Delta H_f$ MSEM
	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>
M1	336091	457485
M2	346727	498591
M3	376731	474782
Promedio	353183.1 +/- 20000	476953.2 +/- 20000
Valor de referencia	374962	

El resto de los métodos considerados en este trabajo se aplicaron a las curvas experimentales con el objetivo de comparar sus rendimientos colectivos, asumiendo los mismos tiempos de inicio y finalización de la solidificación y los mismos valores de capacidades caloríficas utilizados durante los cálculos. La Figura 6 muestra la primera derivada y las curvas cero calculadas usando los métodos NBL [5] y DBL [7] para la muestra M1. La integración del área entre la primera derivada y las curvas de referencia proporciona la información relevante sobre la entalpía y la evolución de la fracción sólida.



**Figura 6.** Primera derivada y líneas base DBL y NBL para la muestra M1

La Tabla 4 resume los resultados de entalpía promedio obtenidos de las curvas experimentales al aplicar todos los métodos considerados en este trabajo y en la Tabla 5 se enumeran los errores correspondientes calculados para cada método, tomando como referencia los valores de entalpía reportados en la Tabla 1. Los resultados que se muestran en las Tablas 4 y 5 para NBL y DBL sugieren que estos métodos solo pueden usarse para obtener un valor muy burdo del calor latente, incluyendo un error muy significativo en sus predicciones con respecto al valor de referencia de este parámetro. Los resultados que se muestran en estas tablas también sugieren los dos métodos propuestos en este trabajo, MEM y MSEM son capaces de predecir entalpías de fusión relativamente más cercanas a los valores de referencia que los otros métodos, mostrando que para todos la aleación estudiada en este trabajo, el uso de los métodos MEM y MSEM puede ser útil para reducir los errores comúnmente presentes en la determinación de la entalpía de solidificación, bajo condiciones experimentales similares cuando se usan métodos convencionales CA-CCA.

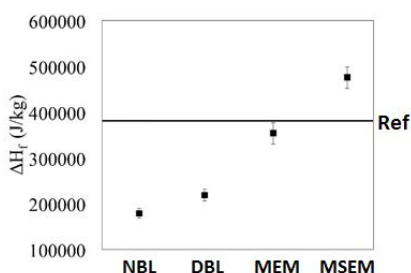
**Tabla 4.** Valores calculados de Entalpía de fusión mediante los 4 métodos CA-CCA considerados en este trabajo

	NBL	DBL	MEM	MSEM	Reference
Alloy	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>
Al14Cu	179666	223695	353183	474782	374962

**Tabla 5.** Error porcentual implícito en los valores de entalpía calculada para Al14%Cu por cada método en comparación con el valor de referencia

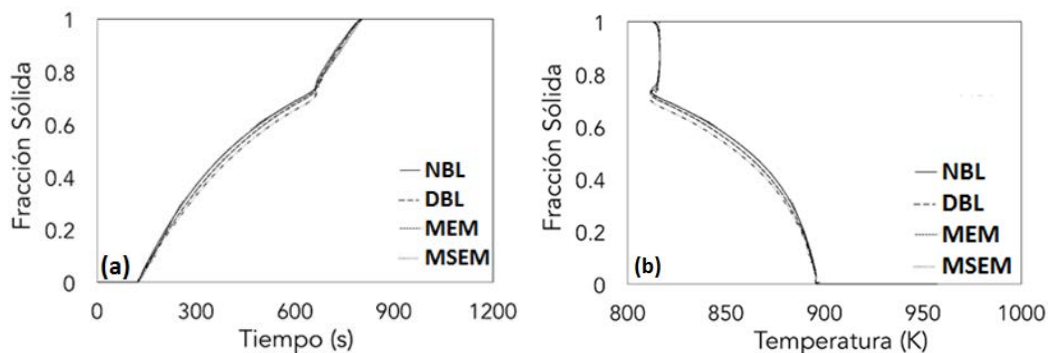
	NBL	DBL	MEM	MSEM
Error (%)	52.1	40.3	5.5	27.2

Para poder comparar más claramente los desempeños de todos los métodos de CA-CCA considerados en este trabajo, la Figura 7 muestra gráficamente los valores promedio obtenidos de entalpías de fusión y las dispersiones asociadas con cada método, incluyendo en la misma gráfica, como una línea gruesa, el valor de referencia reportado en la literatura [17]. Se puede observar en esta figura que, para la aleación utilizada en este trabajo, los métodos MEM y MSEM muestran claramente un mejor desempeño en la determinación de la entalpía de fusión que los otros métodos. De hecho, puede observarse, con respecto a los rendimientos de los métodos MEM y MSEM en la Tabla 5, que el error en la determinación de entalpía es relativamente mayor para MSEM que para MEM como se esperaba, pero para ambos métodos el error fue menor al asociado al resto de los métodos lo cual sugiere que estos métodos se pueden usar para determinar un valor más aproximado del calor latente de solidificación que el obtenido mediante métodos convencionales. Los resultados muestran que el error implícito cuando se usan métodos tradicionales para la determinación del calor latente de solidificación se ubica entre 40% y el 55% de error porcentual con respecto al valor de referencia. Errores similares han sido reportados por Erbas [14] para métodos newtonianos convencionales en el caso de metales puros.



**Figura 7.** Comparación gráfica de los valores calculados de entalpía de fusión con respecto a los valores de referencia

La Figura 8 muestra la evolución de la fracción sólida de la muestra M1 en función del tiempo y en función de la temperatura obtenidas aplicando el procesamiento numérico de las curvas de enfriamiento experimentales, utilizando todos los métodos considerados en este trabajo. Aquí se puede ver que la evolución de la fracción sólida predicha por todos los métodos es relativamente similar, aunque existen diferencias relativamente pequeñas entre los resultados predichos por cada método y representados en estas figuras.



**Figura 8.** Comparación gráfica de las evoluciones calculadas de la fracción sólida usando los cuatro métodos considerados en este trabajo

Los resultados mostrados en las Figuras 7 y 8 sugieren que los métodos propuestos en este trabajo presentan un mejor desempeño en la determinación de la entalpía de solidificación y predicen evoluciones de la fracción similares al de los métodos newtonianos convencionales por lo cual se puede afirmar que los métodos MEM y MSEM muestran un muy buen potencial para ser empleados como métodos CA-CCA alternativos para la obtención de calores latentes y evolución de fracción sólida de la aleación bajo estudio.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que, para la aleación Al-14%Cu bajo estudio los métodos MEM y MSEM presentan un mejor desempeño en la determinación de la entalpía de solidificación y predicen evoluciones de la fracción similares al de los métodos newtonianos convencionales por lo cual se puede afirmar que los métodos MEM y MSEM muestran un muy buen potencial para ser empleados como métodos CA-CCA alternativos.

Los errores encontrados para las predicciones de los calores latentes asociados a los métodos NBL y DBL aplicados a las curvas experimentales de enfriamiento obtenidas van del 40% al 55%, comparados con el valor de calor latente reportado en la literatura, mientras que los métodos MEM y MSEM muestran errores del 5.5 y 27.2% respectivamente. Lo anterior sugiere que el uso de estos métodos alternativos podría ser útil para reducir los errores comúnmente presentes en la determinación del calor latente de solidificación cuando se usan los métodos convencionales CA-CCA.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a los proyectos PAPIIT IN156817 de la UNAM y 225156 de CONACYT México por el apoyo financiero y de infraestructura. También se agradece al Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda y a los Maestros Agustín Ruiz Tamayo y Cándido Atlenco Tlapanco por su valioso apoyo técnico durante la experimentación.

## REFERENCIAS

- [1] Stefanescu, D. (2015). Thermal Analysis Theory and Applications in Metalcasting. *International Journal of Metalcasting* 9(1), 7-22.
- [2] Riposan, I. et al. (2016). Thermal Analysis to Optimize and Control the Cast Iron Solidification Process. *Solid State Phenomena* 254, 14-19.
- [3] Davenport, S. et al. (2012). The usage of computer-aided cooling curve thermal analysis to optimize eutectic refiner and modifier in Al-Si alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 109, 105-111.
- [4] Górný, M., Sikora, G. & Kawalec, M. (2016). Effect of Titanium and Boron on the Stability of Grain Refinement of Al-Cu Alloy. *Archives of Foundry Engineering* 16(3), 35-38.
- [5] Hassan, J., Maryam, K. & Saeed, F. (2017). Computer-aided cooling curve thermal analysis and microstructural evolution of Mg-5Zn-xY cast alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 130(3), 1429-1437.
- [6] Yavari, F. & Shabestari, S. (2017). Effect of cooling rate and Al content on solidification characteristics of AZ magnesium alloys using cooling curve thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 129(2), 655-662.
- [7] Vijayan, V. & Prabhu, K. (2015). Assessment of latent heat and solid fraction of Al-22Si alloy using Newtonian and Fourier analysis techniques. *Materials Science Forum* 830-831, 321-324.
- [8] Barlow, J. & Stefanescu, D. (1998). Computer-aided cooling curve analysis, *Transactions of the American Foundryman Society* 106, 349-354.
- [9] Fras, E. et al. (1993). A new concept in thermal analysis of castings. *Transactions of the American Foundrymen's Society* 101, 505-511.
- [10] Cetin, A. & Kalkanli, A. (2005). Evaluation of latent heat of solidification of grey cast iron from cooling curves. *Canadian Metallurgical Quarterly* 44(1), 1-6.
- [11] Marchwica, P., Sokolowski, J. & Kierkus, W. (2011). Fraction solid evolution characteristics of AlSiCu alloys-dynamic baseline approach. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 47, 115-36.
- [12] Gibbs, J. & Patricio, F. (2008). Solid fraction measurement using equation-based cooling curve analysis. *Scripta Materialia* 58(8), 699-702.
- [13] Erbaş, K. (2016). Analytically Solved Solid Fraction Model for the Newtonian Thermal Analysis of Casting. *Metallurgical and Materials Transactions A* 47(6), 3026-3030.
- [14] Erbaş, K. (2015). A new baseline for the Newtonian thermal analysis of casting: two-capacitive system baseline Modeling the effects of the thermal capacity of mold. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 119, 183-189.
- [15] González, C. et al. (2018). Latent heat determination from cooling curves during solidification by an alternative method considering the metal and the mold cooling. In: 48<sup>o</sup> Seminário de Aciaria.
- [16] González, C. et al. (2017). Cooling Curve Analysis Method using a Simplified Energy Balance. In: 6th Engineering, Science and Technology Conference.
- [17] Rocha, O., Siqueira, C. & Garcia, A. (2003). Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady-state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* 34, 995-1006.
- [18] Gale, W., Terry, C. & Totemeier, C. (2003). *Smithells metals reference book*. Elsevier.

# Efecto de los nanotubos de carbono en la pirólisis térmica y catalítica de polietileno de alta densidad

Omar D. Gutierrez<sup>1</sup>

Nancy Montes V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Metropolitano

<sup>2</sup> Institución Universitaria Pascual Bravo  
Medellín – Antioquia

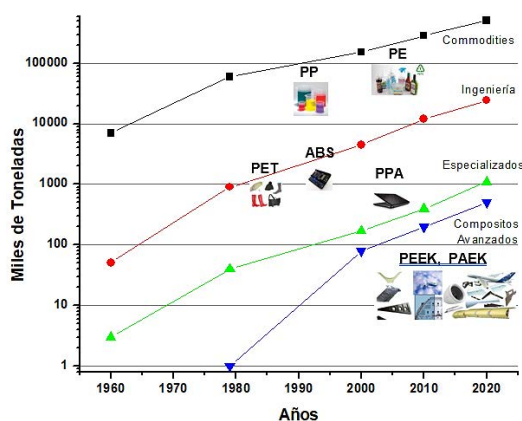
El creciente mercado de nanocompositos poliméricos ha suscitado un gran interés gracias a las mejoras en las propiedades térmicas y mecánicas (entre otras) que las nanopartículas le confieren a la matriz polimérica. Lo anterior ha generado una demanda por tecnologías que puedan valorar sus desechos domésticos e industriales (DDI). Entre las múltiples alternativas de tratamiento de estos desechos, la pirólisis destaca como una vía eficiente y ambientalmente amigable (frente a los típicos procesos de incineración de desechos) para el aprovechamiento del potencial energético y químico residente en los DDI. Esta metodología hace parte de las estrategias del reciclaje químico y en su forma pura (pirólisis térmica), o asistida con un catalizador (pirólisis catalítica), permite modular el rendimiento y distribución de los productos obtenidos en el tratamiento de los DDI. Esto posibilitaría la obtención de vectores energéticos y la recuperación de insumos o materias primas para su reinserción en una gran variedad de procesos productivos. Teniendo en cuenta el crecimiento y desarrollo de los nanocompositos poliméricos y que en el sector de los plásticos, las poliolefinas representan el 50% de la demanda mundial, siendo el polietileno uno de los principales constituyentes, en este trabajo se traza como objetivo estudiar el efecto de incorporar nanotubos de carbono (CNT) en matrices de polietileno de alta densidad (HDPE), orientando el estudio hacia el efecto que los CNT tendrán sobre las cinéticas de termodegradación y sobre la distribución de los productos (sólidos, productos condensables y gases) generados con pirólisis térmicas y catalíticas.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Consumo actual de polímeros

Los polímeros se han consolidado como un bien de consumo indispensable en nuestra sociedad [1,2], en la que el rápido crecimiento poblacional, aunado a sus inherentes demandas de una realidad con mayor confort y tecnificación, ha estimulado el desarrollo de polímeros especializados y commodities con nuevas y mejores propiedades (térmicas, mecánicas, eléctricas, de barrera, etc.).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra que los polímeros con mayor nivel de producción son los commodities los que, basados principalmente en las poliolefinas, exhiben como sus mayores representantes al polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinil (PVC), poliestireno (PS), polietilentereftalato (PET) y alcohol polivinílico (PVA) [3]. Adicionalmente puede observarse que, si bien los polímeros para aplicaciones especializadas/avanzadas son producidos en menor cantidad, en los últimos diez años la velocidad de crecimiento anual promedio (VCAP) ha sido semejante a la de los polímeros commodities, situándonos claramente ante una sociedad de elevado consumo tecnológico en la que la gestión de los productos con mediano-alto valor tecnológico, que han sido descartados o dados de baja, ha comenzado a hacerse significativa. La Tabla 48 recoge las estadísticas asociadas al consumo indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y muestra que entre los años 1960-2000 (lapso de 40 años) la VCAP fue del 8,2%, mientras que entre los años 2000-2020 (lapso de 20 veinte años), se estima que esta será del 6,25%.



<sup>1</sup> omargutierrez@itm.edu.co

<sup>2</sup> nmontes@pascualbravo.edu.co

Figura 86. Consumo Mundial de las diferentes gamas de polímeros

Tabla 48. Consumo Mundial de Polímeros (Kilo-toneladas)[4]

Tipo de Polímero	1960	1979	2000	2010	2020	VCAP 1960-2000	VCAP 2000-2020
Commodities	7000 (99,2%)	60000 (98,4%)	155000 (97,0%)	287000 (95,8%)	510000 (95,1%)	8%	6,15%
Ingeniería	50 (0,8%)	900 (1,5%)	4500 (2,8%)	12000 (4,0%)	24500 (4,6%)	12%	8,8%
Especializados	3 (0,0%)	40 (0,1%)	170 (0,1%)	400 (0,1%)	1100 (0,2%)	11%	9,8%
Compositos	0 (0,0%)	1 (0,0%)	80 (0,1%)	200 (0,1%)	500 (0,1%)	23%	9,6%
Avanzados	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0%	0%
Total	7053	60941	159750	299600	536100	8.2%	6,25%

Valores entre paréntesis corresponden a la composición porcentual de cada clase de polímero en cada año

## 1.2 Inserción de los materiales nanocompositos en el mercado mundial

Como se mencionó anteriormente, los polímeros de alta gama están adquiriendo una velocidad de generación y consumo importante en nuestros tiempos. Hoy día se emplean mezclas matriz-polimérica/relleno en las que el relleno suele consistir en partículas (tipo esferas, fibras, láminas, tubos, anillos, etc), con tamaños, en al menos una de sus dimensiones, de orden micro y/o preferentemente nanométricos (1-100 nm), dando paso, estos últimos, a la generación de los polímeros nanocompositos (PNC). Los PNC, por tener una gran área interfacial de interacción matriz-nanopartícula, cuentan con propiedades muy superiores a las exhibidas por la matriz polimérica pura [5-10], resultando así, potencialmente prometedores en aplicaciones biomédicas (terapéuticas y de diagnóstico), electrónicas, fotónicas, ópticas, automotrices y aeroespaciales entre otras [6,10]. Así por ejemplo, el mercado mundial de los PNC alcanzó en el 2003 los 90.8 millones de dólares excediendo en el 2008, los 210 millones de dólares a una VCAP de 18.4 %[11]. Solo para Estados Unidos, se estima que en el 2020 la demanda de PNC será de aprox. 3200 kilo-toneladas, con un valor próximo a los 15 mil millones de dólares [12,13].

Pasando a un escenario más general que contemple todo tipo de nanocompositos, puede verse en la Figura 87, el ascenso y proyección de estas hasta el año 2016, en los que, para el año 2011 se estima que el 44 % del consumo (en términos económicos) fue en "nanocompositos de arcilla" (NC\_A), seguidos de los "nanocompositos de óxidos metálicos/metales" (NC\_OM/M) con un 20%, luego los "nanocompositos de tipo cerámico"(NC\_C) con 11.5%, los "compositos de nanotubos de carbono"(CNT's) con 7.5%y "otros nanocompositos" con un 17% (e.g., puntos cuánticos, nanofibras, nanotubos de titanio, grafeno). Para este mismo año, se estima que la implementación de estas nanoestructuras primó fundamentalmente en los sectores de: Envasado/Embalaje (>28%), Energía (>26%), Automotriz (>15%), Recubrimientos (>14%) y Recubrimientos con Descarga Electroestática (<17%) [11].

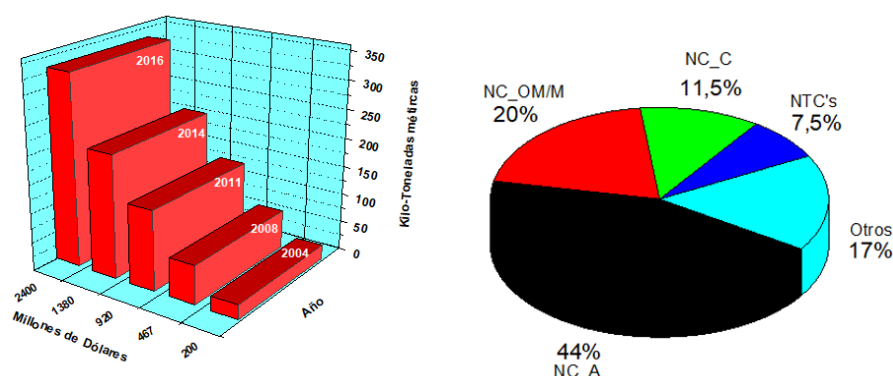


Figura 87. Mercado y distribución de materiales nanocompositos. (Izquierda) Proyección hasta el año 2016. (Derecha) Distribución de los sistemas nanocompositos en el año 2011 [10,11]

## 1.3 Estrategias de recuperación o reciclaje para los polímeros nanocompositos

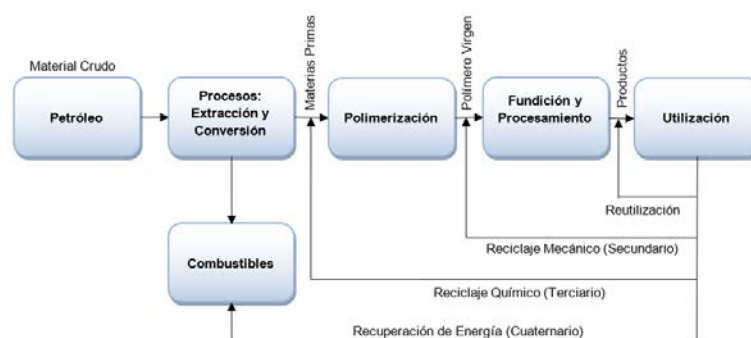
De los aspectos considerados en las secciones anteriores, es plausible considerar que los polímeros nanocompositos serán una contribución importante en el conjunto de los materiales nanocompositos. Dado esto, resulta lógico transferir (y/o adaptar) las estrategias de recuperación y reciclaje en el manejo de desechos poliméricos (plásticos), a el manejo de los polímeros nanocompositos, en pro de tener un buen punto de partida que permita madurar los conocimientos y procesos necesarios para su eficiente aprovechamiento. Estas estrategias pueden clasificarse en cuatro tipos principales (ver Figura 88) [3,14].

1. *Reutilización (Reciclaje Primario)*. Es la reintroducción de trozos o piezas plásticas al ciclo de extrusión con el objeto de obtener productos similares a aquellos de los que provenían estos fragmentos o partes. Esta opción sería ciertamente preferible considerando su aporte a la atenuación de emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, sin embargo, los



recursos operacionales implicados en la adecuación (limpieza y separación) de los fragmentos plásticos hacen que esta alternativa sea poco popular cuando se trata de los desechos plásticos de origen doméstico, siendo principalmente utilizada al interior de los ciclos productivos de las industrias [3,14].

2. *Reciclaje Mecánico (Reciclaje Secundario)*. En este caso los desechos plásticos son tratados mecánicamente junto con otros rellenos y/o resina virgen para obtener nuevos productos. Este tipo de reciclaje es eficiente en la medida en que se reprocese un solo tipo de polímero a la vez, pues, si la muestra a reciclar es más heterogénea contaminada o compleja, más difícil resultará aplicar esta metodología.
3. *Reciclaje Químico (Reciclaje Terciario)*. El reciclaje químico es entendido como el conjunto de tecnologías avanzadas que convierten materiales plásticos en moléculas más pequeñas, usualmente líquidos o gases, aptas como combustibles, o como insumos para la producción de nuevos plásticos y productos petroquímicos, sin ninguna clase de deterioro o restricción en su calidad y aplicabilidad, reduciendo de paso, la llegada de nuevos desechos plásticos a los vertederos y rellenos sanitarios [16,17]. La tecnología detrás de su éxito se sustenta en los procesos de de-polimerización, con los que pueden diseñarse esquemas industriales muy aprovechables y sustentables con altos rendimientos y bajos desechos. Pueden citarse, entre los métodos que constituyen el reciclaje químico, la quimiólisis, la gasificación y la pirólisis (craqueo realizado en ausencia de oxígeno) [1].
4. *Recuperación Energética (Reciclaje Cuaternario)*. Cuando las restricciones económicas y/o técnicas hacen poco viable la aplicación de los anteriores tipos de reciclaje, el reciclaje cuaternario (incineración en total o parcial presencia de oxígeno) puede ofrecer una alternativa interesante considerando el elevado poder calorífico (PC) de los plásticos. Por ejemplo, un kilogramo de polietileno (PC: 44.9 MJ/kg) produce la misma energía que un kilogramo de gasóleo (PC: 45.2 MJ/kg) y mucho más que el carbón (PC: 29 MJ/kg) [18,19]. Así, un envase de yogurt (300 mL) contiene la energía necesaria para mantener una bombilla encendida durante una hora [18] y algunas estimaciones indican que por cada tonelada de desechos orgánicos incinerados, se evitaría el consumo de 250 L de aceite combustible aproximadamente [1].



**Figura 88.** Intervención de los tipos de reciclaje en la cadena de producción de polímeros [3,15]

Si bien en países como Suiza, Suecia, Dinamarca, Alemania y Japón; la incineración de los desechos sólidos municipales tiene amplia aceptación, cuenta también con riesgos e impactos que restringen su uso y aprobación pública, pues se generan emisiones de hollín e hidrocarburos aromáticos policíclicos (como furanos y dioxinas), los cuales han sido identificados como carcinógenos, mutágenos, teratógenos y neurotóxicos [1,20,21].

#### 1.4 La pirólisis como una estrategia de reciclaje para los polímeros nanocompositos

Con las anteriores estrategias de reciclaje se ha visto que, si bien con la incineración los desechos pueden recuperarse como energía, su poca aceptación pública ha limitado su aplicabilidad. Por otro lado, si se admite que:

- Los rellenos sanitarios no son la solución más racional siendo solo una alternativa provisional.
- Los reciclajes primario y secundario cuentan con un mercado limitado (y fluctuante) para los productos reciclados, y, técnicamente, son poco eficientes y poco eficaces al operar con mezclas complejas de plásticos.

Queda, como una opción que está ganando una creciente importancia, la vía del reciclaje químico. Dentro de esta categoría, la operación de pirólisis se perfila como una apuesta promisoriosa de desarrollo y protección ambiental [22–24], y destaca por sus ventajas operacionales, ambientales y económicas (ver Figura 89), entregando, fundamentalmente, una fracción remanente no-volátil y una serie de productos volátiles que abandonan el reactor.



**Figura 89.** Algunas ventajas del proceso de pirólisis [3,16,17]

La fracción no-volátil la componen, además del contenido mineral original en las materias primas, diferentes formas de carbón residual denominadas genéricamente como char (cuando provienen de una pirólisis térmica) y coque (cuando provienen de una pirólisis catalítica), caracterizadas por ser estructuras poli-aromáticas. Este carbón residual puede procesarse posteriormente para liberar su contenido energético [3], para generar carbón activado (proceso Shell) [3] y, últimamente, se ha venido explorando como una potencial fuente para la generación de nanotubos de carbono [25,26]. Adicionalmente, los productos volátiles pueden ser condensables (líquidos, ceras, parafinas alifáticas y aromáticas, aceites) y no-condensables (gases). Los volátiles condensables, pueden emplearse para generar combustibles y productos petroquímicos, y con los gases, pueden obtenerse mezclas con poderes caloríficos de 22 - 30 MJm<sup>-3</sup> dependiendo del material procesado.

Por ejemplo, la energía teórica necesaria para pirolizar 1 kg de polietileno (~1,3 MJ) [27,28] y transformarlo en una mezcla de combustibles de composición (%p/p): 2% gas, 46% gasolina, 34% diesel y 18% aceite residual [27]; resulta ser del orden de un 3% de su poder calorífico (44.9 MJ/kg). Esto deja una ganancia neta aprox. de 42 MJ/kg [27,28] que le confiere a los productos de la pirólisis, una oferta exergética comparable a la que se obtendría mediante la combustión directa (reciclaje cuaternario) del polietileno, con el valor agregado de no generar las tan cuestionadas emisiones propias de la incineración.

Es importante considerar, sin embargo, que la pirólisis pura (o térmica) arroja un amplio espectro de productos y requiere altas temperaturas (500 - 900 °C), por lo que en pro de reducir sus demandas energéticas y lograr un mayor control en la selectividad y rendimiento de los productos obtenibles, un gran número de estudios se han realizado en torno a la pirólisis catalítica. La Tabla 49 presenta los atributos típicos de las pirólisis térmica y catalítica [1,29].

**Tabla 49.** Aspectos Generales de las Pirólisis Térmica y Catalítica

Pirólisis Térmica	Pirólisis Catalítica
Alta producción de gases C <sub>1</sub> y C <sub>2</sub> .	Alta producción de gases C <sub>3</sub> S y C <sub>4</sub> S.
Olefinas son menos ramificadas.	Olefinas son más ramificadas.
Algunas diolefinas se generan a altas temperaturas.	Las parafinas se generan mediante transferencias de hidrógeno. Los aromáticos son producidos mediante la deshidrogenación de naftenos y ciclación de olefinas.
Productos con amplia distribución de pesos moleculares (limitada selectividad hacia la gasolina).	Alta selectividad hacia la gasolina (compuestos C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> ).
Reacción lenta comparada con la pirólisis catalítica.	Disminución en el tiempo de reacción y la temperatura de degradación.
Conversión limitada de los residuos carbonosos.	La distribución de los productos puede controlarse dependiendo del tipo de polímero y del tipo de catalizador. Catalizadores no adecuados pueden generar exceso de coque o de gas.

La temperatura es el parámetro de pirólisis de mayor influencia. Tomando como caso las poliolefinas, en la medida en que la temperatura disminuya, las ceras y las fracciones parcialmente convertidas, tenderán a aumentar su rendimiento. El craqueo térmico de poliolefinas es usualmente realizado a altas temperaturas (>700 °C), para producir una mezcla gaseosa C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> junto con compuestos aromáticos (benceno, tolueno y xileno), o a bajas temperaturas (400-500 °C) en las que se obtienen gases con alto poder calorífico, aceites y ceras [29]. Procurando obtener vectores energéticos incorporables en el mercado, operando aún a bajas temperaturas de pirólisis, la opción de pirólisis catalítica ha mostrado que entre los 390 y 425 °C, puede obtenerse una óptima producción de diesel. Adicionalmente, el aumento de la velocidad de reacción reduce el volumen necesario del reactor, y se puede aumentar la producción de iso-alcanos y compuestos ramificados, cíclicos y aromáticos [29]; útiles en múltiples ámbitos de la industria petroquímica.

A la luz de los antecedentes hasta aquí planteados en torno a la inclusión de los polímeros nanocompositos en nuestra sociedad, su potencial impacto medioambiental y las posibilidades del reciclaje químico mediante la operación de pirólisis, se hace necesario investigar el efecto de las nanopartículas en la degradación térmica y catalítica de poliolefinas. Con base en esto, este trabajo presenta los resultados obtenidos sobre el efecto de nanotubos de carbono en el rendimiento y distribución de los productos condensables y no-condensables durante la pirólisis isotérmica de polietileno de alta densidad, en función de las variables de operación: temperatura, carga de nanopartícula y carga de catalizador (empleándose en este caso mordenita de origen natural). Adicionalmente, mediante ensayos termogravimétricos dinámicos (pirólisis no-isotérmica) se determinan los parámetros cinéticos aparentes (modelo

cinético, energía de activación y factor pre-exponencial) en función de la carga de nanopartícula y la carga de catalizador.

### 1.5 Análisis Termogravimétricos

En la ciencia de polímeros, los métodos de análisis térmico han sido usados en importantes aplicaciones, y entre estas, la determinación de los parámetros cinéticos nominales (energía de activación, factor pre-exponencial y modelo cinético), asociados a los fenómenos de termo-degradación ha sido crucial. Para tales fines, los análisis termogravimétricos (TG) son una técnica común, ampliamente aplicada, con la cual pueden probarse sus mecanismos de degradación y también aportar en la predicción de su termo-estabilidad y su vida de servicio[30]. Las curvas TG y las curvas de velocidad de pérdida de masa (DTG) a diferentes tasas de calentamiento permiten, mediante la aplicación de varios métodos propuestos, determinar los parámetros cinéticos nominales (conocidos también como tripleta cinética). Los diversos métodos de análisis que sustentan la literatura se basan en la ecuación (1) [31–33].

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T)f(\alpha) \quad (1)$$

Siendo,  $\alpha$  = La fracción que ha reaccionado (avance de la reacción) en el instante  $t$ , la cual se define con la ecuación (2).

$$\alpha = \frac{(masa\ inicial)-(masa\ en\ el\ instante\ t)}{(masa\ inicial)-(masa\ final)} \quad (2)$$

y  $f(\alpha)$  = modelo cinético de descomposición.

La ecuación (1) propone que en un proceso de degradación isotérmico la derivada del avance de la reacción de descomposición ( $\alpha$ ) es función de la temperatura ( $K(T)$ ) y de la fracción transformada ( $f(\alpha)$ ). Suponiendo que el término  $K(T)$  sigue un comportamiento de Arrhenius, la ecuación (1) puede reescribirse como la ecuación (3).

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E_a/RT} f(\alpha) \quad (3)$$

Donde:  $A$  = Factor pre-exponencial ( $s^{-1}$  o  $min^{-1}$ );  $E_a$  = Energía de activación (kJ/mol) ;  $T$  = La temperatura absoluta (K);  $R$  = Constante universal de los gases ( $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Si el ensayo se realiza en condiciones dinámicas a una tasa de calentamiento  $\beta$ , la ecuación (3) adopta la forma de la ecuación (4)

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-E_a/RT} f(\alpha) \quad (4)$$

Separando variables, considerando una tasa de calentamiento lineal ( $\beta$ ), e integrando, se obtiene la ecuación (5).

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-E_a/RT} dT \quad (5)$$

Definiendo:  $g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)}$  y considerando que  $\beta$  será cero para toda  $T < T_0$  (siendo  $T_0$  típicamente la temperatura ambiente) se obtiene la ecuación (6).

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_0^T e^{-E_a/RT} dT \quad (6)$$

Para las funciones  $f(\alpha)$  y  $g(\alpha)$  se han propuesto múltiples expresiones, de las cuales, se recogen en la Tabla 50 aquellas que típicamente describen los procesos de degradación en los polímeros [31,34,35]. Las funciones  $f(\alpha)$  al estar directamente relacionadas con el cambio diferencial de  $\alpha$  (ecuaciones (1) a (3)), reciben el nombre de formas o expresiones diferenciales. Mientras que las expresiones  $g(\alpha)$  son conocidas como formas integrales dada su definición en términos de  $f(\alpha)$  y su relación con los parámetros cinéticos (ecuaciones (5) y (6)). Los modelos presentados en la Tabla 50 suelen ser de tipo sigmoidal, en los que la velocidad de pérdida de masa alcanza un valor máximo para luego ir disminuyendo; o de tipo deceleratorio, en los que la velocidad de pérdida de masa disminuye conforme avanza la degradación; y de acuerdo a su base mecánica se pueden clasificar en modelos de nucleación, contracción geométrica, difusión y orden general [31].

**Tabla 50.** Clasificación de los modelos cinéticos de descomposición [31,34,35]

Modelo	Forma diferencial $f(\alpha)$	Forma Integral $g(\alpha)$
Modelos de Nucleación		
Ley de Potencia (P2)	$2\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$
Ley de Potencia (P3)	$3\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$
Ley de Potencia (P4)	$4\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$
Avrami-Erofeyev (A2)	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$
Avrami-Erofeyev (A3)	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}$
Avrami-Erofeyev (A4)	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$[- \ln(1-\alpha)]^{1/4}$
Modelos de Contracción Geométrica		
Contracción de Área (R2)	$2(1-\alpha)^{1/2}$	$1 - (1-\alpha)^{1/2}$

Contracción de Volumen (R3)	$3(1-\alpha)^{2/3}$	$1 - (1-\alpha)^{1/3}$
Modelos de Difusión		
Difusión uni-dimensional (D1)	$1/(2\alpha)$	$\alpha^2$
Difusión bi-dimensional (D2)	$-[1/\ln(1-\alpha)]$	$((1-\alpha)\ln(1-\alpha)) + \alpha$
Difusión-Jander tri-dimensional (D3)	$[3(1-\alpha)^{2/3}]/[2(1 - (1-\alpha)^{1/3})]$	$(1-(1-\alpha)^{1/3})^2$
Ginstling-Brounshtein (D4)	$3/[2((1-\alpha)^{-1/3} - 1)]$	$1 - (2/3) \alpha - (1-\alpha)^{2/3}$
Modelo	Forma diferencial $f(\alpha)$	Forma Integral $g(\alpha)$
Modelos de Orden de Reacción		
Orden Cero (F0, R1)	1	$\alpha$
Primer Orden (F1)	$(1-\alpha)$	$-\ln(1-\alpha)$
Segundo Orden (F2)	$(1-\alpha)^2$	$[1/(1-\alpha)] - 1$
Tercer Orden (F3)	$(1-\alpha)^3$	$(1/2)[(1-\alpha)^{-2} - 1]$

De acuerdo a las ecuaciones (2), (3) o (5); el conocimiento de la tripleta cinética ( $f(\alpha)$  o  $g(\alpha)$ ,  $E_a$ ,  $A$ ) permitirá simular el comportamiento TG del sistema estudiado isotérmica o dinámicamente. Retomando la ecuación (5), definiendo  $y = E_a/RT$ , se tiene la ecuación (7).

$$g(\alpha) = \frac{AE_a}{\beta R} \int_y^\infty \frac{e^{-y}}{y^2} dy \quad (7)$$

Encontrándonos ante la integral  $\int_y^\infty e^{-y}/y^2 dy$ ; conocida como la integral de temperatura o integral de Arrhenius. Esta integral no tiene solución analítica, por lo que diversas aproximaciones han sido implementadas en pro de obtener una expresión de fácil manejo que vincule los datos experimentales que entrega un análisis TG. Las estrategias para solucionar la integral de temperatura incluyen el expresarla mediante una expansión en series [36–38] o mediante expresiones racionales [37] tipo  $\int_y^\infty e^{-y}/y^2 dy = [q(y)/r(y)]e^{-y}$ . De estas estrategias se han derivado una gran variedad de métodos que pueden agruparse en los dos siguientes conjuntos.

- *Métodos que no suponen un mecanismo  $f(\alpha)$  o  $g(\alpha)$ .* Estos métodos buscan determinar la energía de activación ( $E_a$ ) y el factor pre-exponencial ( $A$ ) sin suponer un mecanismo  $f(\alpha)$  o  $g(\alpha)$  determinado, razón por la que se les conoce en la literatura como "Model Free Methods". Para determinar  $E_a$  y  $A$ , estos métodos se basan en las temperaturas necesarias (a varias tasas  $\beta$ , para alcanzar un mismo grado de conversión (métodos iso-conversionales). Estos métodos pueden ser diferenciales (e.g. método de Friedman, FR) o integrales (e.g. Flynn-Wall-Ozawa, FWO; Kissinger-Akahira-Sunose, KAS; y Starink). En los métodos FR, FWO, KAS y Starink, representados con las ecuaciones (8), (9), (10) y (11) respectivamente; para  $\alpha = \text{cte}$ , la gráfica de los términos del lado izquierdo de estas ecuaciones vs.  $1/T$  (obtenidos de los termogramas registrados a varias tasas de calentamiento), correspondería a una línea recta cuya pendiente permite una evaluación de la energía de activación ( $E_{a,iso}$ ) [33,38–40].

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(Af(\alpha)) \quad (8)$$

$$\ln\beta = -1.0518 \frac{E_a}{RT} + C_2 \quad (9)$$

$$\ln\frac{\beta}{T^2} = -\frac{E_a}{RT} + C_2 \quad (10)$$

$$\ln\frac{\beta}{T^\kappa} = -C_1 \frac{E_a}{RT} + C_2 \quad (11)$$

En la ecuación (11) Starink plantea que el caso  $\kappa = 1.92$  and  $C_1 = 1.0008$  [38,40] ofrece el menor error relativo tomando como referente, el ampliamente aceptado, polinomio de cuarto orden propuesto por Senum & Yang [38], por lo que en este estudio se implementará el método de Starink para la determinación de la energía de activación a lo largo de la pirólisis o termodegradación. Una comparación de las ecuaciones (7) a (10) muestra que, en términos de las constantes  $\kappa$ ,  $C_1$  y  $C_2$ ; los métodos FWO y KAS son casos particulares de la forma general propuesta por Starink.

- *Métodos que suponen un mecanismo  $f(\alpha)$  o  $g(\alpha)$ .* Parten del hecho de que la expresión cinética correcta ( $f(\alpha)$  o  $g(\alpha)$ ) replicará la curva TG experimental, por lo que, a diferencia de los "Model Free Methods", estos métodos prueban todos los mecanismos de descomposición eligiendo el candidato (o posibles candidatos) que mejor describa el comportamiento real del sistema en estudio. Entre estos métodos pueden citarse los métodos de Coats-Redfern y de Curvas-Maestras.
- *Método de Coats-Redfern.* Aproximando la integral de temperatura con los dos primeros términos de una expansión asintótica [38,41], es posible llegar a la ecuación (12).

$$\ln\left[\frac{g(\alpha)}{T^2}\right] = \ln\frac{AR}{\beta E_a} - \frac{E_a}{RT} \quad (11)$$

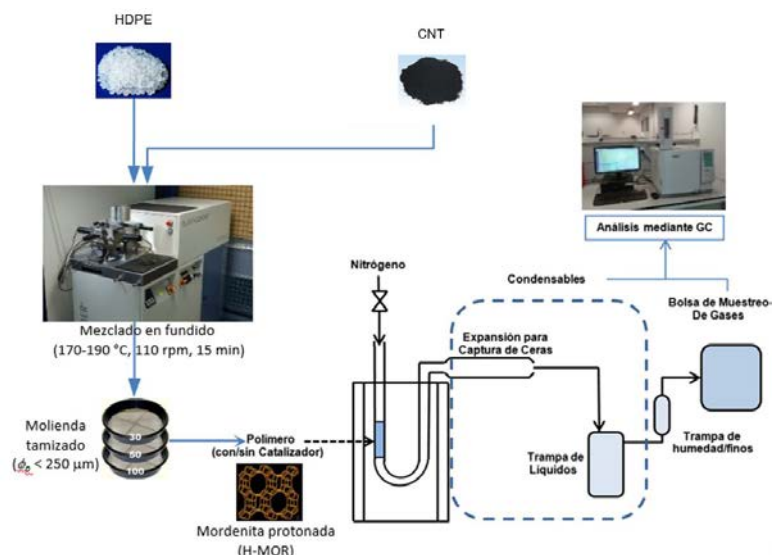
En la que el mecanismo  $g(\alpha)$  que efectivamente describa el proceso de degradación, satisfará la relación lineal  $\ln\left[\frac{g(\alpha)}{T^2}\right]$  vs  $\frac{1}{T}$  permitiendo obtener los parámetros  $E_a$  y  $A$ . Vale decir que las ecuaciones (8-12) son válidas para valores de  $E_a/RT$  superiores a 20, condición que se cumple en los casos de estudio aquí considerados. El método de Coats-Redfern puede conducir a tripletas cinéticas erróneas, pues los términos  $\ln AR/\beta E_a$  y  $E_a/RT$  pueden

compensarse por efecto del ajuste matemático, ofreciendo una correlación lineal equiparable para varios mecanismos  $f(\alpha)$  simultáneamente, a expensas de entregar valores de  $E_a$  y  $A$  desvinculados del fenómeno físico-químico de degradación. Para prevenir esta situación, el algoritmo de cálculo en este estudio consistió en:

1. Determinar la energía de activación con el método de Starink (ecuación (10)).
2. Probar todos los mecanismos de la Tabla 50 en la expresión de Coats-Redfern (ecuación (11)).
3. Elegir el mecanismo que mejor equilibre los ítems anteriores.

## 2. MÉTODO

Empleando HDPE (MFI = 8 g/10 min, Ipiranga Petroquímica) y nanotubos de carbono multipared (Baytubes C150P, Bayer Material Science AG), se prepararon mezclas en fundido (170 °C y 110 rpm por 15 min) en un equipo Brabender (Plasticorder) de doble tornillo empleando porcentajes p/p de 3 (HDPE3CNT) y 6 (HDPE6CNT) % de CNT (Figura 90). Las mezclas obtenidas fueron peletizadas, molidas y tamizadas (tamaños inferiores a 250  $\mu$ m) y, mediante un reactor semibatch tipo U de pyrex (diámetro interno de 1 cm; largo de 20 cm) inmerso en un horno tubular, sometidas a pirólisis (atmósfera de nitrógeno) térmicas o catalíticas a 450 °C/40 min utilizando una carga de 30% p/p de mordenita protonada (H-MOR) como catalizador. Los productos generados durante las pirólisis fueron colectados por condensación en una expansión (trampa para ceras) y en un colector inmerso en un baño de hielo/sal a aprox. -5 °C (trampa para líquidos), mientras que los gases fueron almacenados en bolsas de muestreo tedlar (1.5 L). Los productos se clasificaron como (Al-Salem & Lettieri, 2010): gases (C1-C4), líquidos (C5-C10), ceras (C10-C40) y "sólidos remanentes (SR)" (C40 < compuestos). Los "SR" son la mezcla de los residuos sólidos carbonosos y del conjunto de oligómeros provenientes de la matriz polimérica original. El rendimiento de los "SR" y de los condensables (ceras+líquidos) se calculó con los cambios de masa en el reactor, expansión y colector, antes y después de cada reacción, mientras que el rendimiento de los gases se estimó con un balance de masa. La composición de los gases y condensables se determinó mediante cromatografía gaseosa (Shimadzu GC-2010 con detector FID).



**Figura 90.** Secuencia experimental para la preparación de las matrices HDPE-CNT y los ensayos de pirólisis isotérmica

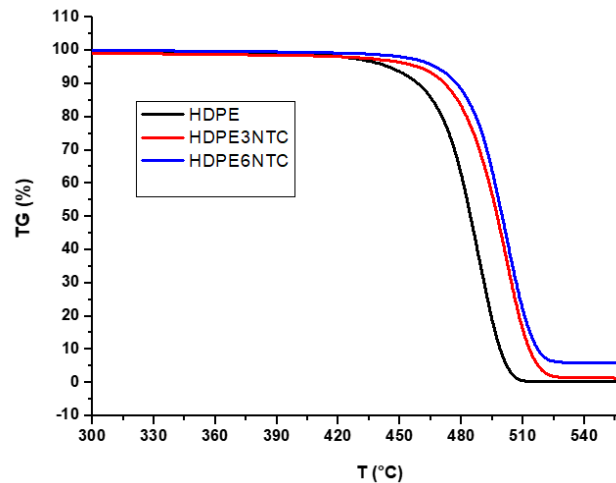
### 2.1 Ensayos de Pirólisis No-Isotérmica (Ensayos Termogravimétricos)

Las reacciones de pirólisis no-isotérmica se realizaron mediante ensayos termogravimétricos en un equipo TG 209-F1 Libra (NETZSCH) en una atmósfera de nitrógeno entre los 30 °C y 600 °C. La masa cargada en cada ensayo fue del orden de 5-10 mg, el flujo de nitrógeno fue de 20 mL/min y las tasas de calentamiento ( $\beta$ ) fueron de 5, 10, 15 y 20 K/min.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Efectos de los CNT en la degradación de HDPE

Los resultados TG muestran que los CNT ejercen un efecto estabilizante en la degradación térmica (Figura 91), siendo este, más notorio a bajos contenidos (3% p/p) de CNT; como puede deducirse a partir de los parámetros  $\Delta T$ -Onset y  $\Delta T$ -T<sub>máx</sub> presentados en la Tabla 51.



**Figura 91.** Degradación Térmica de HDPE a varias cargas (%p/p) de CNT ( $\Delta=20\text{K}/\text{min}$ )

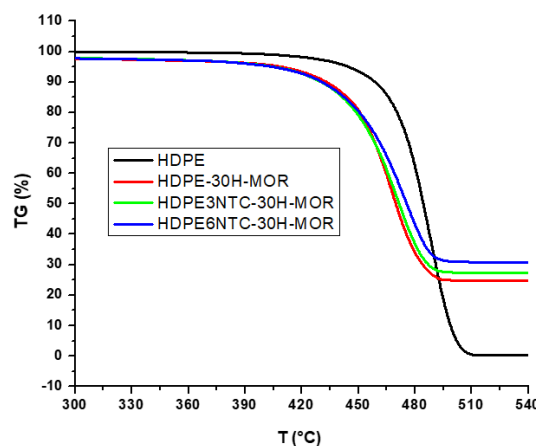
La poca diferencia entre estos parámetros para HDPE3CNT Y HDPE6CNT puede deberse a una aglomeración de los CNT durante la pirólisis. Esta aglomeración reduciría el área superficial de los CNT llevándolos a una condición de microcompositos (en lugar de nanocompositos), haciendo que su efecto sobre la variación de las temperaturas  $T_{\text{onset}}$  y  $T_{\text{máx}}$  se hace menos efectivo. Este tipo de aglomeración fue evidenciada por Pöllänen et al. [42] en mezclas de HDPE con nanotubos de carbono multipared (con tamaños de hasta  $1\ \mu\text{m}$ ), independiente de la carga (2 y 6 %p/p) de nanotubos empleada. Este fenómeno de aglomeración también se ha observado en mezclas de nylon con nanoarcillas [6]. En mezclas de HDPE con CNTMP Chrissafis et al.[43] observaron agregados con tamaños de 50-300 nm producto de los puentes de hidrógeno que se establecen entre los grupos superficiales carboxilo e hidroxilo presentes en los nanotubos.

**Tabla 51.** Parámetros asociados a la degradación térmica de HDPE

Parámetros Térmicos	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT
Onset (°C)	470,6	481,1	483,0
Inflection (°C)	490,5	502,0	502,5
End (°C)	502,2	514,9	514,2
Mass Change (%)	-99,0%	-94,7%	-94,2%
$\Delta T - \text{Onset}$ (°C)	0,0	10,5	12,4
$\Delta T - T_{\text{máx}}$ (°C)	0,0	11,5	12,0

Siendo  $\Delta T = [T_i - T_{\text{polietileno puro}}]_{\text{pirólisis térmica}}$ ; para  $i = \text{HDPE, HDPE3CNT, HDPE6CNT}$ .

En la degradación catalítica (Figura 92 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) los CNT no mostraron un cambio importante sobre el inicio de la descomposición pirolítica ( $\Delta T - \text{Onset}$  en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), debiéndose esto a la alta proporción de H-MOR (entre 7 y 14 veces mayor) respecto al contenido de CNT.



**Figura 92.** Degradación Catalítica de HDPE a varias cargas (%p/p) de CNT ( $\beta=20\text{K}/\text{min}$ )

**Tabla 52.** Parámetros asociados a la degradación catalítica de HDPE

Parámetros Térmicos	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT
Onset (°C)	445,8	447,8	447,1
Inflection (°C)	468,7	475,0	476,7

End (°C)	483,1	490,2	489,8
Mass Change (%)	-70,7%	-68,0%	-65,0%
$\Delta T - \text{Onset}$ (°C)	0,0	1,9	1,2
$\Delta T - T_{\text{máx}}$ (°C)	0,0	6,3	7,9
Siendo $\Delta T = [T_i - T_{\text{polietileno puro}}]_{\text{pirólisis catalítica}}$ ; para $i = \text{HDPE, HDPE3CNT, HDPE6CNT}$			

El cambio observado en el  $\Delta T - T_{\text{máx}}$  indica una mayor resistencia en HDPE3CNT Y HDPE6CNT, a la liberación de las especies volátiles generadas durante la pirólisis. Esto sugiere un efecto de barrera o de tortuosidad por parte de los CNT a lo largo de la descomposición; resultado también encontrado por Chrissafis et al. [43]. El comportamiento de los CNT en la pirólisis catalítica, muestra que estos afectan el desempeño de la H-MOR considerando, como se mencionó anteriormente, que la proporción H-MOR/CNT es de 7 a 1 para HDPE6CNT, y de 14 a 1 para HDPE3CNT.

### 3.2 Efecto de los CNT en la pirólisis de HDPE

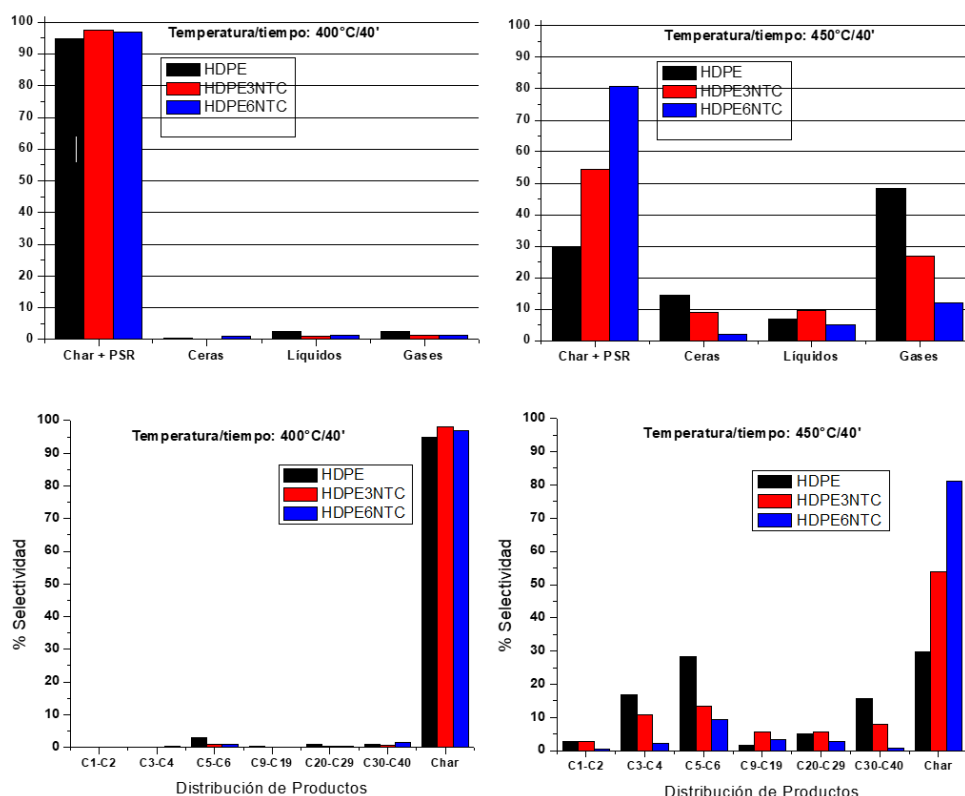
1. *Efecto de los CNT en la Pirólisis Térmica de HDPE.* También en la pirólisis térmica (Figura 93) se ve reflejado el efecto estabilizante de los CNT mediante la disminución en la conversión del HDPE (mayores niveles de char+PSR). A 450 °C, mejora la conversión de HDPE puro generándose un alto rendimiento de gases debido al sobrecrequeo, en tanto que la distribución de productos es amplia, característica típica de una pirólisis térmica. A 400 °C, la revisión detallada de la gama de compuestos C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> (ver Tabla 53), muestra que esta no varió significativamente entre HDPE y HDPE3CNT.

Para las dos temperaturas, los compuestos C<sub>5</sub> y C<sub>6</sub> fueron los productos mayoritarios. A modo de ejemplo, la siguiente secuencia de reacciones [44] explica la formación de penteno y hexeno (Figura 9). En la que puede verse que después de la escisión aleatoria inicial, los radicales pueden experimentar transferencias intramoleculares de hidrógeno 1,4 y 1,5 con su subsecuente escisión- $\beta$ , dando lugar al penteno y hexeno respectivamente. Es importante destacar, que los otros radicales generados, pueden ser precursores de los compuestos C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, como el propileno, el isobutano y el isobuteno.

**Tabla 53.** Selectividad Relativa de los compuestos C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> en la Fase Gaseosa para la Pirólisis Térmica

Temperatura de Pirólisis	Selectividad (%) en la Fase Gaseosa - Pirólisis Térmica						Compuestos Principales
	400 °C			450 °C			
	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT	
C1-C2	0,4	0,3	1,5	0,5	1,1	1,0	Etileno, etano
C3	1,3	0,8	4,7	0,8	2,6	3,0	Propileno
C4	1,4	2,0	6,3	2,1	6,3	4,2	Isobutano, isobuteno
C5	11,9	8,9	19,5	7,6	10,3	20,7	Penteno, Pentano
C6	85,0	87,9	68,0	89,1	79,6	71,0	C <sub>6</sub> *
% Rendimiento de Fracción Gaseosa	3	1	1	48	27	12	

C<sub>6</sub>\*: Mediante cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), se lograron identificar (sin cuantificar) la presencia de: 1,2,3-trimetil ciclopropano, 3-metil pentano, 2-metil penteno, 3-hexeno, 3-metil (Z) 2-penteno, (E) 3-hexeno, 3-metil (E) 2-penteno y 2,3-dimetil buteno.



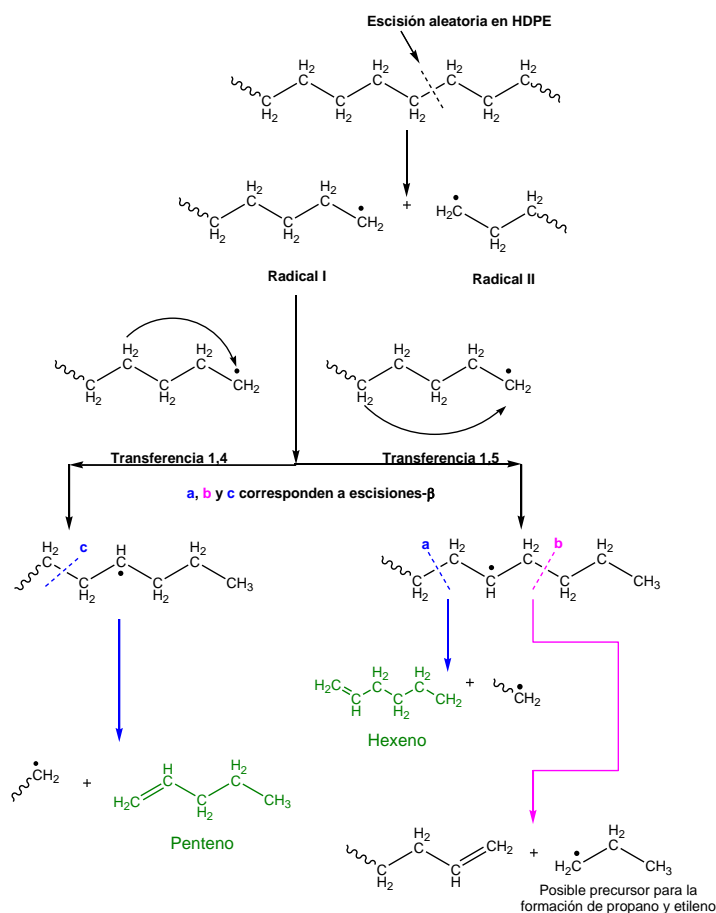
**Figura 93.** Rendimientos y Distribución de Productos en la Pirólisis Térmica, a 400 °C y 450 °C (durante 40 min), de HDPE a varias cargas (%p/p) de CNT

*Efecto de los CNT en la Pirólisis Catalítica de HDPE.* En este caso puede verse (Figura 95) que ciertamente la mordenita utilizada (H-MOR) facilita la degradación de HDPE puro orientando los rendimientos hacia los líquidos y gases creando, además, una distribución más selectiva de los productos (compuestos C<sub>3</sub>-C<sub>19</sub>). Independiente de la temperatura y carga de CNT, la pirólisis catalítica siguió el esquema de reacción bimolecular, como puede verse a partir de la baja selectividad hacia los compuestos C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>. A 400 °C, para HDPE y HDPE3CNT, se genera una cantidad importante de coque, debido a que en los sitios ácidos interiores de los canales lineales de la H-MOR, se forman y acumulan compuestos cíclicos y/o aromáticos, producidos mediante reacciones secundarias [45, 46].

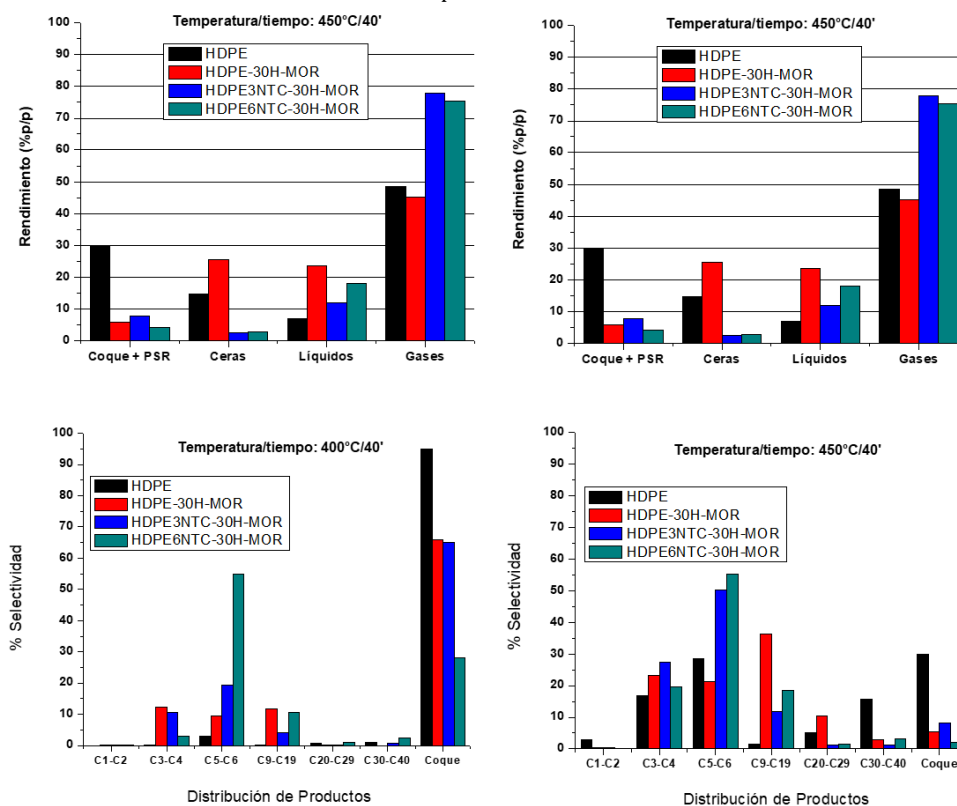
Para HDPE6CNT, a 400 °C, parece que el efecto barrera de los CNT le permite a la H-MOR estar en un contacto moderado con las cadenas poliméricas posibilitando el craqueo sin que lleguen a presentarse reacciones secundarias, resultando una mayor producción de gases. Esto es bastante interesante en términos de la vida útil del catalizador (la desactivación catalítica es menor), y de la selectividad en la distribución de los productos obtenidos (compuestos en el rango de las gasolinas C<sub>4</sub>-C<sub>11</sub>). A 450 °C, el sobre-craqueo catalítico:

- Aumenta la producción de volátiles no-condensables (gases),
- Aumenta el fraccionamiento de los oligómeros formados durante la degradación, ampliando un poco la distribución de productos, pero manteniendo aún una zona de selectividad en torno a los compuestos C<sub>3</sub>-C<sub>19</sub>.





**Figura 94.** Formación de penteno y hexeno mediante transferencias (intramoleculares) de hidrógeno 1,4 y 1,5 respectivamente



**Figura 95.** Rendimientos y Distribución de Productos en la Pirólisis Catalítica, a 400 °C y 450 °C (durante 40 min), de HDPE a varias cargas (%p/p) de CNT

Es importante resaltar que, a diferencia de la pirólisis térmica, en la pirólisis catalítica los CNT parecen modificar (directa o indirectamente) los mecanismos de escisión, pues se observa una redistribución de los productos caracterizada por una alta selectividad hacia los compuestos C<sub>3</sub>-C<sub>9</sub>, los cuales, de acuerdo con los análisis GC-MS

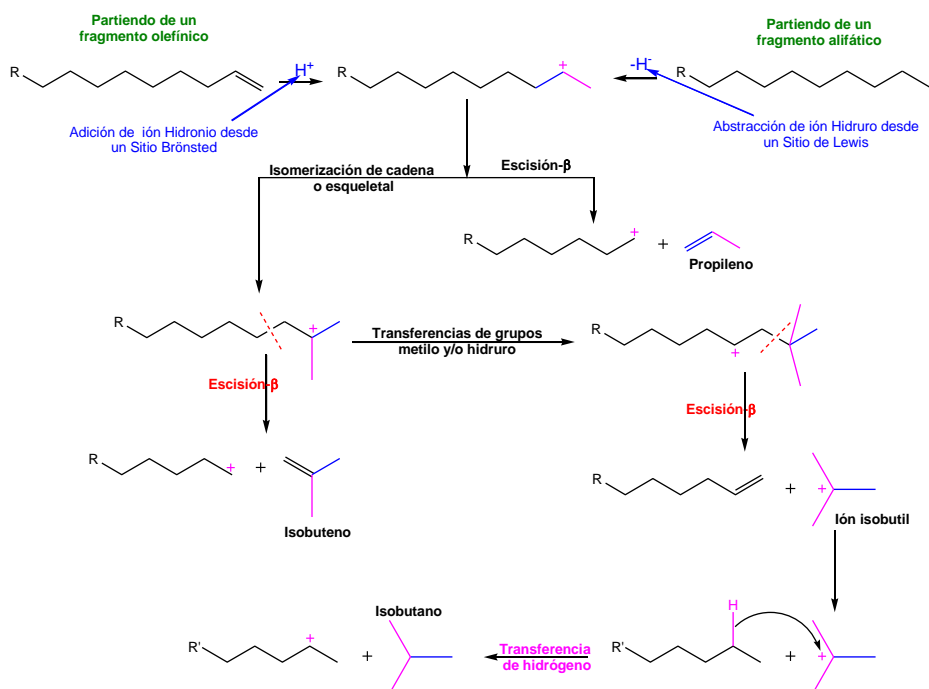
cuentan con isómeros del butano (además de isómeros C<sub>5</sub> y C<sub>6</sub>), que son potenciales precursores del iso-octano. También se observa que, a 450 °C, el potencial térmico hace que en los sistemas HDPE3CNT y HDPE6CNT, los rendimientos sean similares, indicando esto que un incremento en la temperatura logra neutralizar la tortuosidad conferida por un aumento en la carga de los CNT. De otro lado, en pro de detallar un poco más el comportamiento composicional de los productos obtenidos, la Tabla 54 precisa la composición de los compuestos volátiles C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>.

**Tabla 54.** Selectividad Relativa de los compuestos C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> en la Fase Gaseosa para la Pirólisis Catalítica

Temperatura de Pirólisis	Selectividad (%) en la Fase Gaseosa - Pirólisis Catalítica						Compuestos Principales
	400 °C			450 °C			
	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT	HDPE	HDPE3CNT	HDPE6CNT	
C1-C2	0,8	0,5	0,1	0,5	0,5	0,3	Etileno
C3	15,7	8,7	10,9	22,6	7,9	5,1	Propileno
C4	37,0	23,0	28,7	44,2	26,3	18,5	Isobutano, isobuteno
C5	23,8	21,7	38,3	13,4	16,7	19,3	C <sub>5</sub> *
C6	22,7	46,1	32,0	19,3	48,6	56,8	C <sub>6</sub> *
% Rendimiento de Fracción Gaseosa	22	30	58	45	78	75	

C<sub>5</sub>\*: Igual que con los compuestos C<sub>6</sub>\*, fue posible identificar (sin poder cuantificarse) mediante GC-MS la presencia de los compuestos: pentano, penteno, 3-metil buteno, 2-metil butano, etil ciclopropano, 1,3 (Z) pentadieno, 2 (E) penteno.

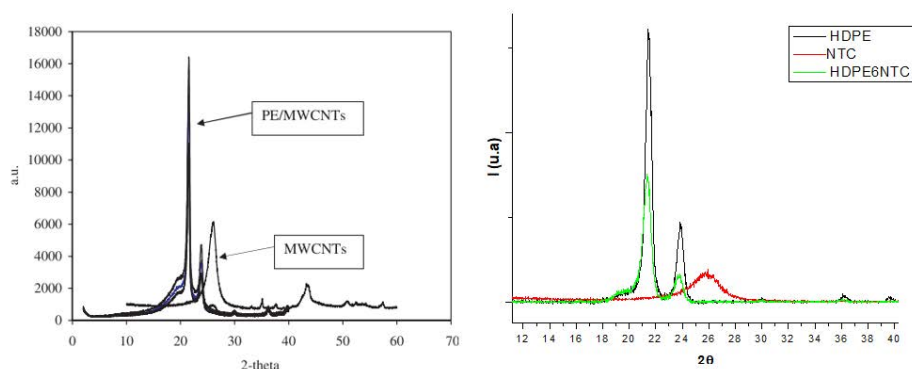
Si se compara la proporción de C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> a C<sub>4</sub>'s presente en las tablas 6 y 7, puede verse que esta es mayor en el caso catalítico. Esto reafirma el mecanismo vía iones carbenio, pues la isomerización de estos iones se da porque la diferencia en estabilidad entre un ión carbenio terciario y uno primario es mayor de 65 kcal, mientras que un radical libre terciario es alrededor de 11 kcal más estable que un radical primario. De modo que la formación de altos niveles de isobutano e isobuteno respecto a C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> es un indicio de un mecanismo catalítico que procede vía intermediarios tipo iones carbenio [47]. Adicionalmente, de la Tabla 54 puede verse que a diferencia de la pirólisis térmica, en el caso catalítico los compuestos C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> tienen una contribución importante. Una propuesta de las posibles vías de formación de los compuestos propileno, isobutano e isobuteno se ilustra en la Figura 96 [47]. En esta figura destacan las reacciones de transferencia intra (isomerización del grupo metilo) e intermoleculares (grupos metilo, hidruro, hidrógeno), acompañadas de las escisiones-β.



**Figura 96.** Formación de propileno, isobutano e isobuteno mediante reacciones de transferencias y escisiones-β [47]

Los resultados de las pirólisis térmica y catalítica revelan el importante papel de las reacciones de transferencia en la evolución de los productos obtenidos. Por ejemplo, si la transferencia de hidrógeno 1,5 sucede una, dos, tres y cuatro veces (que denominaremos transferencias de orden superior), generará alquenos de 6, 10, 14 y 22 carbonos; y alcanos de 3, 7, 11 y 15 carbonos respectivamente [44]. De modo que es importante preguntarse por el modo en que la interacción entre los CNT, la matriz polimérica y la H-MOR pueda afectar y/o modificar estas reacciones de descomposición. McNally et al. [48] investigaron mezclas de polietileno y nanotubos de carbono multipared (con cargas de 0,1 ,1 y 10 % p/p), mediante las técnicas de espectroscopía Raman, SEM, AFM, HRTEM, XRD, resistividad y análisis reológico dinámico; y sugieren que, además de quedar muy bien dispersados (mezclado en fundido) en la matriz de PE, los CNT quedaron recubiertos con películas de PE. Una de las formas de

advertir la buena dispersión de los CNT, fue mediante el patrón de difracción de rayos X (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(a)), en el que el peak a  $2\theta = 26^\circ$  (plano 002) corresponde al ordenamiento de los cilindros concéntricos de carbono grafitico [48]. Este peak no está presente en el patrón del PE puro y se encuentra ampliamente reducido en el patrón del nanocomposito PE/MWCNT, lo cual evidencia un eficiente mezclado de los CNT en la matriz de PE. Además, hay una reducción en la intensidad, y ensanchamiento, de los peaks (110) y (200) del PE puro, indicándose una alteración en sus fases cristalinas y amorfas.



**Figura 97.** (a) Patrones de difracción para PE, MWCNT y el nanocomposito PE/MWCNT[48]. (b) Patrones de difracción para HDPE, CNTMP y HDPE6CNT

El comportamiento reportado por McNally y colaboradores, también se evidenció en las mezclas de HDPE y CNT consideradas en este trabajo. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(b) muestra los patrones de difracción obtenidos para HDPE, CNTMP y HDPE6CNT, observándose una clara correspondencia con el comportamiento reportado por McNally. Con base en esto, resulta plausible considerar que los CNT se encuentran recubiertos por el HDPE. Bajo esta configuración espacial, y el ambiente electrónico (hibridación  $sp^2$  y electrones  $\pi$  [49]) de los CNT, parece que estos:

- En la Pirólisis Térmica: Promueven las transferencias de hidrógeno 1,4 y 1,5 de orden superior. Lo que explicaría la distribución amplia y un tanto más homogénea (respecto al HDPE puro) de los productos reportados en la Figura 93.
- En la Pirólisis Catalítica: Podrían estabilizar los diversos iones carbenio posibilitando una amplia gama de transferencias, isomerizaciones y escisiones- $\beta$  facilitando la formación de múltiples isómeros  $C_5$  y  $C_6$ . Esto explicaría el alto rendimiento de los  $C_5$ - $C_6$  (ver Figura 95) y su variedad de isómeros  $C_5$ - $C_6$  (Tabla 53 y 7).

### 3.3 Efecto de los CNT en la cinética de termodegradación de HDPE

Luego de aplicar los métodos y el algoritmo de decisión comentados en la sección 2.2, se sintetizan en las Tablas 8 y 9 la información relevante respecto a las tripletas cinéticas encontradas para las matrices derivadas del HDPE. Puede verse que los mecanismos de termodegradación son de contracción geométrica (tipo R), que los CNT no modifican el mecanismo en el caso térmico, resultado concordante con el obtenido por Bocchini et al. [50]; y que el catalizador efectivamente cambia el mecanismo de descomposición.

**Tabla 55.** Energía de activación obtenida con el método Starink-1,92 para las degradaciones térmica y catalítica de HDPE

E(kj/mol)	PE	PE3CNT	PE6CNT	PE_30HMOR	PE3CNT_30HMOR	PE6CNT_30HMOR
Starink-1,92 Curvas Maestras	242 ± 14	229 ± 9	202 ± 16	184 ± 31	235 ± 14	173 ± 8

**Tabla 56.** Parámetros cinéticos calculados con el método de Coats-Redfern para los mecanismos de degradación elegidos para las matrices de HDPE

PE		PE3CNT		PE6CNT		PE_30HMOR		PE3CNT_30HMOR		PE6CNT_30HMOR	
$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom	$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom	$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom	$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom	$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom	$E_a$ Prom (kj/mol)	A(min <sup>-1</sup> ) Prom
253 ± 25	3,9E+17	259 ± 39	5,1E+16	237 ± 74	2,4E+18	203 ± 34	6,1E+14	243 ± 15	2,2E+16	195 ± 15	2,1E+13
Mecanismo R1_F0		Mecanismo R1_F0		Mecanismo R1_F0		Mecanismo R2		Mecanismo R3-R2		Mecanismo R2	

El valor de  $E_a$  obtenido para el HDPE puro y los mecanismos de contracción geométrica, han sido reportados anteriormente en varias poliolefinas (HDPE, LDPE, PP) [51]. Normalmente, las  $E_a$  reportadas están entre 160 y 320 kJ/mol [52–54]; dada la variedad de métodos y condiciones TG para determinarlas. En este caso puede verse que las energías obtenidas se corresponden con el intervalo de valores reportado. Articulando estos resultados con los presentados en las secciones precedentes, puede proponerse que:

- En la pirólisis térmica, los CNT con su alta razón de aspecto y envueltos por las cadenas de HDPE, mantienen los mecanismos de degradación unidimensional (R1-F0), ralentizando la descomposición por efectos estéricos (mayor tortuosidad física). Esta degradación unidimensional (axial) es coherente con las transferencias de hidrógeno 1,4 y 1,5 de orden superior.
- En la pirólisis catalítica se generan descomposiciones de tipo cilíndrica (R2) y esférica (R3). Estas descomposiciones en dos y tres dimensiones se corresponden con las reacciones de transferencia e isomerización en las que se generan compuestos de menor tamaño (en torno a los C<sub>6</sub>) con un mayor grado de ramificación (isomerización).

#### 4. CONCLUSIONES

En la pirólisis térmica, los CNT retardan la descomposición térmica, confiriéndole estabilidad térmica a las matrices de HDPE, sin alterar de forma importante el rendimiento de los productos.

En la pirólisis catalítica, los CNT ejercen un efecto protector sobre el catalizador evitando su desactivación por formación de coque, generando una mayor disponibilidad de los sitios ácidos de reacción que se traduce en una mayor conversión orientada hacia una mayor gasificación.

El efecto protector de los CNT en la pirólisis catalítica es más notorio a bajas temperaturas (400°C), sin embargo, a altas temperaturas (450°C) los CNT hacen más cerrada la distribución de productos, sobre una zona (C<sub>3</sub>-C<sub>8</sub>), que sigue siendo interesante por su potencial octanaje.

Los CNT favorecen las transferencias de hidrógeno de orden superior en la pirólisis térmica; generándose una amplia distribución de tamaños en los compuestos obtenidos. Mientras que en la pirólisis catalítica, las reacciones involucran la participación de un menor número de átomos de carbono y se propician las isomerizaciones. Esto genera compuestos con una distribución de tamaños más cerrada.

En la pirólisis térmica Los CNT propician una fragmentación unidimensional (mecanismo R1) en las cadenas de HDPE. En tanto que en la pirólisis catalítica propician una fragmentación de tipo radial (mecanismos R2 y R3).

## REFERENCIAS

- [1] Kumar, S., Panda, A. & Singh R. (2011). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 893–910.
- [2] Zhou, Q. et al. (2004). Catalytic degradation of low-density polyethylene and polypropylene using modified ZSM-5 zeolites. *Polymer Degradation and Stability* 84, 493–497.
- [3] Al-Salem, S., Lettieri, P. & Baeyens, S. (2011). The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science* 36, 103–129.
- [4] Pardos, Fe. (2012). *Studies*. Online [May 2018].
- [5] Moncada, E. et al. (2006). Use of grafted with itaconic acid as a new compatibilizer for pp/clay nanocomposites. *Macromolecular Chemistry and Physics* 207(15), 1376–1386.
- [6] Chrissafis, K. & Bikiaris, D. (2011). Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal composition of addition polymers. *Thermochimica Acta* 523, 1–24.
- [7] Yang, B. et al. (2008). Enhancement of the mechanical properties of polypropylene using polypropylene- grafted multiwalled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 68, 2490–2497.
- [8] Peng, X., Ding E. & Xue, F. (2012). In situ synthesis of TiO<sub>2</sub>/polyethylene terephthalate hybrid nanocomposites at low temperature. *Applied Surface Science* 258(17), 6564–6570.
- [9] Funck, A. & Kaminsky, W. (2007). Polypropylene carbon nanotube composites by in situ polymerization. *Composites Science and Technology* 67(5), 906–915.
- [10] Duncan, T. (2011). [Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors](#). *Journal of colloid and interface science* 363, 1–24.
- [11] Research, B. (2017). [Global Markets for Nanocomposites, Nanoparticles, Nanoclays, and Nanotubes](#). Online [May 2018].
- [12] Marketwired (2012). [U.S. Polymer Nanocomposites Demand to Exceed 7 Billion Pounds in 2020](#). Online [May 2018].
- [13] Euroresidentes (2003). [Expectativas de los nanocompuestos poliméricos](#). Online [May 2018].
- [14] Al-Salem, S., Lettieri, P. & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Management* 29(10), 2625–43.
- [15] Brems, A. et al. (2013). Gasification of plastic waste as waste-to-energy waste-to-syngas recovery route. *Natural Science* 5(6), 695-704.
- [16] Lin, Y. et al. Catalytic degradation of high density polyethylene over mesoporous and microporous catalysts in a fluidised-bed reactor. *Polymer Degradation and stability* 86, 121–128.
- [17] Mastellone, M. et al. (2002). Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene. *Polymer Degradation and stability* 76(3), 479–487.
- [18] Berenguer, D. (2008). *Craqueo Catalítico de Polímeros: Estudio de Diferentes Sistemas Polímero/catalizador*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- [19] Al-Salem, S. & Lettieri, P. (2010). Kinetic study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis. *Chemical Engineering Research and Design* 88(12A), 1599–1606.
- [20] Damgaard, A. et al. (2010). Life-cycle- assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. *Waste Management* 30(7), 1244–50.
- [21] Roes, L. et al. (2012). Preliminary evaluation of risks related to waste incineration of polymer nanocomposites. *Science of the Total Environment* 15, 76–86.
- [22] Singh, B. & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer degra. a stability* 93(3), 561–584.
- [23] Pielichowski, K. & Njuguna, J. (2005). *Thermal Degradation of Polymeric Materials*. First, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- [24] Lin, Y. & Yang, M. (2008). Tertiary recycling of polyethylene waste by fluidised-bed reactions in the presence of various cracking catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 83, 101-109.
- [25] Bazargan, A. & McKay, G. (2012). A review – Synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes. *Chemical Engineering Journal* 195(196), 377–391.
- [26] Moothi, K. et al. (2012). Coal as a carbon source for carbon nanotube synthesis. *Carbon* 50, 2679–2690.
- [27] Scheirs, J. & Kaminsky, W. (2006). *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. John Wiley.
- [28] Feng, G. (2010). *Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels*. Thesis of doctorate. University of Canterbury.
- [29] Butler, E., Devlin, G. & McDonnell, K. (2011). A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading. *Renewable and sustainable energy reviews* 15(8), 4171-4186.
- [30] Omrani, A., Rostami, A. & Ravari, F. (2012). Advanced isoconversional and master plot analyses on solid-state degradation kinetics of a novel nanocomposite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 111, 677-683.
- [31] Khawam, A. & Flanagan, D. (2006). *Solid-State Kinetic Models: Basics and Mathematical Fundamentals*. *The Journal Of Physical Chemistry B*, 110(35), 315–328.
- [32] Sánchez, P. et al. (2010). A new model for the kinetic analysis of thermal degradation of polymers driven by random scission. *Polymer degradation and stability* 95, 733-739.
- [33] Vyazovkin, S. et al. (2011). ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta* 520(1), 1–19.
- [34] Hatakeyama, T. & Quinn, F. (1999). *Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science*. John Wiley.
- [35] Núñez, L. et al. (2000). Thermogravimetric study of the decomposition process of the system BADGE (n=0)/1,2 DCH. *Polymer* 41(12), 4635–4641.
- [36] Ozawa, T. (1970). Kinetic Analysis of derivative curves in thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and calorimetric* 2, 301–324.
- [37] Zsakó, J. (1998). Remarks on a New Equation for Modeling Nonisothermal Reactions. *Jou. of Thermal Anal.* 34, 1489–1494.
- [38] Starink, M. (2003). The Determination of Activation Energy from Linear Heating Rate Experiments: A Comparison of the Accuracy of Isoconversion Methods. *Thermochimica Acta* 404, pp. 163-176.

- [39] Budrugaec, P. et al. (2004). The use of the IKP method for evaluating the kinetic parameters and the conversion function of the thermal dehydrochlorination of PVC from non-isothermal data. *Polymer Degradation and Stability* 84, 311–320.
- [40] Starink, M. (1996). A new method for the derivation of activation energies from experiments performed at constant heating rate. *Thermochimica Acta* 288, 97-104.
- [41] Grueiro, L. (2001). Estudio Cinético, Dinamomecánico y Termogravimétrico Del Sistema Epoxídico BADGE(n=0/m-XDA Mediante Las Técnicas de Análisis Térmico: DSC, DMA Y TGA. Construcción de Un DiagramaTTT. Tesis doctoral. Universidade de Santiago de Compostela.
- [42] Pollanen, M. et al. (2011). Influence of Carbon Nanotube–Polymeric Compatibilizer Masterbatches on Morphological, Thermal, Mechanical, and Tribological Properties of Polyethylene. *Composites Science and Technology* 71(10), 1353–1360.
- [43] Guo, C. , Zhou, L., J. Lv. (2013). Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites. *Polymer & Polymers composites* 21, 449-456.
- [44] Hujuri,U., Ghoshal, A. & Gumma, S. (2010). Temperature-dependent pyrolytic product evolution profile for low-density polyethylene from gas chromatographic study. *Waste Management* 30, 814–20.
- [45] Miskolczi, N., Bartha, L. & Deák, G. (2006). Thermal degradation of polyethylene and polystyrene from the packaging industry over different catalysts into fuel-like feed stocks. *Polymer Degradation and Stability* 91, 517–526.
- [46] Elordi, G. et al. (2007). Product distribution modelling in the thermal pyrolysis of high density polyethylene. *Journal of Hazardous Materials* 144(3), 708–714.
- [47] Seddegi, Z. et al. (2002). Catalytic cracking of polyethylene over all-silica MCM-41 molecular sieve. *Applied Catalysis A: general* 225, 167-176.
- [48] McNally T. et al. (2005). Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites. *Polymer* 46(19), 8222–8832.
- [49] Rahman, A. et al. (2011). A review of the applications of nanocarbon polymer composites. *Nano: Brief Reports and Reviews* 6, 185–203.
- [50] Bocchini, S. et al. (2007). Polyethylene thermal oxidative stabilisation in carbon nanotubes based nanocomposites. *European Polymer Journal* 43, 3222–3235.
- [51] Aboulkas, A., El Harfi, K. & El Bouadili, A. (2010). Thermal degradation behaviors of polyethylene and PS. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management* 51, 1363-1369.
- [52] Lomakin, S. et al. (2011). Thermal degradation of biodegradable blends of polyethylene with cellulose and ethylcellulose. *Thermochimica Acta* 521, 66–73.
- [53] Gao, Z. et al. (2003). Calculation of activation energy from fraction of bonds broken for thermal degradation of polyethylene. *Polymer degradation and stability* 81, 125-130.
- [54] Lomakin, S. et al. (2006). Thermal degradation and combustion of a polypropylene nanocomposite based on organically modified layered aluminosilicate. *Polymer Sciences Serie A* 48, 72–84.

## Desarrollo e Innovación en Ingeniería (Tercera Edición)

Esta tercera edición de Desarrollo e Innovación en Ingeniería es fiel a las anteriores, en el sentido de presentarle a la comunidad el trabajo de una serie de investigadores que, como resultado de sus procesos investigativos, han querido ponerlo en sociedad. Se respetan los criterios de revisión científica y de estructura que convierten al texto, tal como lo recomiendan los pares evaluadores, en un libro resultado de investigación. Los lectores podrán consultar capítulos en diversas disciplinas ingenieriles y en Ciencias Computacionales, con un contenido base y de aporte al cuerpo de conocimiento en cada una de ellas, en los que los autores plasman los resultados de su trabajo científico.

ISBN: 978-958-59127-9-3



**Editorial  
IAI**