



**TESIS DOCTORAL**

**MODELO PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO**

MILTON RODRIGO ALDÁS SÁNCHEZ

**Directores:** Antonio Alonso Ayuso  
David Ríos Insua  
Marco Javier Flores Calero

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Octubre, 2015





**Dr. Antonio Alonso Ayuso**, Profesor Titular del Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos.

**AUTORIZA:**

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

**MODELO PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO**

Realizada por **Don Milton Rodrigo Aldás Sánchez** bajo su inmediata dirección y supervisión en el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa, que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Rey Juan Carlos.

En Fuenlabrada, Octubre de 2015.

---

Fdo.: Antonio Alonso Ayuso





**Dr. David Ríos Insua**, AXA-ICMAT Chair en el Instituto de Ciencias Matemáticas del CSIC.

**AUTORIZA:**

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

**MODELO PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO**

Realizada por **Don Milton Rodrigo Aldás Sánchez** bajo su inmediata dirección y supervisión en el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa, que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Rey Juan Carlos.

En Fuenlabrada, Octubre de 2015.

---

Fdo.: David Ríos Insua





**Dr. Marco Javier Flores Calero**, profesor de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).

**AUTORIZA:**

La presentación de la Tesis Doctoral titulada

**MODELO PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO**

Realizada por **Don Milton Rodrigo Aldás Sánchez** bajo su inmediata dirección y supervisión en el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa, que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Rey Juan Carlos.

En Sangolquí, Octubre de 2015.

---

Fdo.: Marco Javier Flores Calero





**Dr. Enrique Cabello Pardos**, Director del Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos.

**INFORMA:**

Que la presente Tesis Doctoral titulada

**MODELO PARA LA EXPANSIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO**

Ha sido realizada por Don Milton Rodrigo Aldás Sánchez bajo la dirección y supervisión de Don Antonio Alonso Ayuso y que el Departamento de Ciencias de la Computación, Arquitectura de Computadores, Lenguajes y Sistemas Informáticos y Estadística e Investigación Operativa ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Fuenlabrada, Octubre de 2015.

---

Fdo.: Enrique Cabello Pardo



## **Agradecimientos:**

Dedico esta tesis a mis hijos Anita, Javier, Vinicio y Manuel y a mi esposa Margoth, que me han apoyado para llegar a esta instancia de mis estudios, y han estado presentes para apoyarme moral y psicológicamente.

A mi madre y hermanos, gracias por creer en mí cuando la situación parecía difícil de superar. Gracias a ese apoyo, he terminado esta disertación.

A Antonio Alonso Ayuso, porque he sentido su ayuda incondicional en la dirección de este trabajo.

A David Ríos, de quien he conseguido los conocimientos necesarios para poder desarrollar esta investigación. Este trabajo no hubiese sido posible sin tu ayuda. Gracias a tu cariño, esfuerzo, dedicación y empeño he conseguido culminar esta tesis.

A Marco Flores Calero, que me ha ayudado incondicionalmente. Sin su esfuerzo, comentarios, e ideas esta tesis no habría visto la luz.

A José María Lavín por su amistad y apoyo incondicional para alcanzar el objetivo de acabar este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros, y en especial, a Marcelo, Julio y Fabián, quienes han formado parte de esta aventura y siempre estarán en mis recuerdos por todo su apoyo.

A Galo Naranjo, Rector de la Universidad Técnica de Ambato, por el apoyo institucional.

A Judith Aguas, secretaria de la Universidad Técnica de Ambato, que me ha brindado su ayuda para salir adelante.

Humildemente, gracias. Para vosotros, todo mi cariño y respeto.



# Índice general

|  |      |
|--|------|
| Índice general .....   | xiii |
| Capítulo 1: Expansión de la capacidad de tráfico. El caso de Ambato .....                        | 1    |
| 1.1. El problema de tráfico en las ciudades .....  | 1    |
| 1.2. Descripción de Ambato .....   | 2    |
| 1.3. El tráfico en Ambato.....   | 4    |
| 1.4. Algunas alternativas planteadas hasta el momento .....                                      | 13   |
| 1.5. Objetivos de la tesis.....  | 14   |
| 1.6. Conclusiones.....   | 17   |
| Capítulo 2: Análisis crítico de estimación de modelos de flujos de tráfico .....                 | 19   |
| 2.1. Introducción.....   | 19   |
| 2.2. Algunos conceptos y modelos de gestión de tráfico en redes .....                            | 20   |
| 2.3. Modelos de estimación de flujo de tráfico.....  | 26   |
| 2.4. Conclusiones.....   | 38   |
| Capítulo 3: Estimación del flujo de tráfico usando algoritmos genéticos .....                    | 39   |
| 3.1. Introducción.....   | 39   |
| 3.2. Datos disponibles.....  | 40   |
| 3.3. Elementos de un Algoritmo Genético para la estimación de flujos de tráfico en una red ..... | 44   |
| 3.4. Estimación del flujo de tráfico en la red del Mercado Modelo usando AG .....                | 50   |
| 3.5. Interpretación de los resultados .....  | 53   |
| 3.6. Aplicación a la red de tráfico del casco central urbano de Ambato .....                     | 57   |
| 3.7. Conclusiones.....   | 67   |

|  |     |
|--|-----|
| Capítulo 4: Un modelo de simulación para la mejora y expansión de la capacidad de tráfico..... | 69  |
| 4.1. Introducción.....   | 69  |
| 4.2. Soluciones.....   | 70  |
| 4.3. Modelo estocástico de flujo de tráfico.....   | 73  |
| 4.4. Impacto de las actuaciones sobre el modelo.....   | 79  |
| 4.5. Evaluación del impacto de las intervenciones.....   | 87  |
| 4.6. Minimización de tiempos de viaje.....   | 92  |
| 4.7. Conclusiones.....   | 98  |
| Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros.....   | 101 |
| 5.1. Conclusiones.....   | 101 |
| 5.2. Trabajos futuros.....   | 104 |
| Bibliografía.....  | 107 |
| Anexo 1 .....  | 113 |
| Anexo 2 .....  | 138 |

## Abstract

The problems of traffic flow and traffic jams, as exemplified in the downtown area of Ambato. This problem has worsened in recent times due to population growth, the present educational institutions, banking institutions, business institutions and the large increase in private transportation.

Citizens need to move quickly through a city to accomplish various business and professional activities without reducing their quality of life. Thus, they need to use different kinds of transportation efficiently. Hence it is necessary to plan appropriate solutions for a flowed mobility. In the case of Ambato, the capacity of the roads were designed for low traffic flows many years ago. Over time, the increase of vehicular fleet has grown from 25,510 in the year 2006 to 67,000 vehicles in 2012 or a better advantage of it.

To model the traffic flow problem, it has been used origin-destination matrices O-D. To estimate them, we have presented a new method based on Genetic Algorithms (G-A), where we transform the original problem into a problem of optimization seeking the best solution from a set of feasible solutions. Then the results of G-A are presented on the city's map graphically. This allows to identify which routes where it is necessary to improve traffic jams.

Then, we study the implementation and simulation of a set of policies that and improving the vehicular traffic flow. The countermeasures that have been tested in this research include to change the direction of streets, relocate services, increase the number of lanes, restrict circulation, increase the number of transportation services, delete or modify points of traffic lights, redistribution schedules and detour routes. The problem of transportation is multidimensional so, it is necessary to act simultaneously with several policies to get good results with the proposed model.

To conclude, it can be highlighted that a new and complete proposal has been presented in this to contribute positively to improve urban mobility in general, and in Ambato city, particularly.

# Resumen

En esta tesis se estudian los problemas del flujo de tráfico y la congestión vehicular, más concretamente en el casco urbano de la ciudad de Ambato. Estos problemas se han agudizado en los últimos tiempos debido al crecimiento poblacional, el aumento de entidades educativas, bancarias y comerciales y, especialmente, el incremento excesivo de vehículos de transporte privado.

Los ciudadanos necesitan una forma rápida de trasladarse dentro de una ciudad para cumplir diferentes actividades comerciales y profesionales, sin reducir su calidad de vida. Por ello, necesitan utilizar distintos medios de transporte de manera eficiente. Esto hace necesario planificar y resolver los problemas de congestión vehicular, para plantear soluciones adecuadas que permitan una movilidad fluida.

En el caso de Ambato, la capacidad de las vías fue diseñada para flujos de tráfico bajos, tras el terremoto de 1949 y cuando no había un gran número de coches. Con el paso del tiempo, el incremento vehicular del parque automotor ha pasado de 25.510 en el año 2006 a 67.000 vehículos en el año 2012, lo que hace necesario una mayor infraestructura vial, o un mejor aprovechamiento de la misma.

Para modelizar el problema de flujo de tráfico se han utilizado matrices origen-destino O-D. Para su estimación, se presenta un nuevo método basado en Algoritmos Genéticos (AG), donde se transforma el problema original en un problema de optimización, buscando sucesivamente la mejor solución de entre un conjunto de soluciones factibles. Después, los resultados del AG se muestran gráficamente sobre el mapa del casco urbano, lo que permite identificar rutas en las que resulta necesario actuar para mejorar el tráfico.

Después, se estudia la implementación y simulación de un conjunto de políticas que ayudan a mejorar el flujo vehicular. Las contramedidas que se han ensayado incluyen cambiar el sentido de las calles, relocalizar servicios, aumentar el número de carriles,

restringir la circulación vehicular, aumentar el número de autobuses de transporte público, eliminar o modificar puntos de semáforos, redistribución de horarios y desvío de rutas. La naturaleza del problema de transporte es multidimensional, por lo que es necesario actuar con varias políticas simultáneamente, obteniéndose excelentes resultados con el modelo propuesto.

Finalmente, se puede resaltar que en este trabajo se ha presentado una nueva y completa propuesta que puede contribuir significativamente en la mejora de los problemas de movilidad urbana en general, y, en particular, en la ciudad de Ambato.

# Capítulo 1

## Expansión de la capacidad de tráfico. El caso de Ambato

### 1.1. El problema de tráfico en las ciudades

Desde finales del siglo XX, el transporte en el mundo ha experimentado grandes cambios, debido al crecimiento de la economía mundial y a la globalización. En el siglo XXI, los nuevos sistemas de transporte, deberán ser seguros, eficientes, integrados y, en especial, ambientalmente sostenibles, véase Cal (2007), para poder evitar los traumas o problemas debidos a estos cambios.

Uno de esos problemas es el incremento en el número de vehículos en circulación y el aumento del transporte de bienes. Este incremento de ambos factores ha hecho que muchas ciudades muestren serios problemas de congestión de tráfico en sus principales vías de circulación, provocando embotellamientos, incremento en accidentes viales, etc.

Los factores que intervienen en el problema del tráfico en una ciudad dependen de su sistema de calles. Muchas veces, estos sistemas tiene que operar por encima de su capacidad, con el fin de satisfacer los incrementos de demanda por servicio de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, acceso a las distintas propiedades o estacionamientos.

Esta saturación de la capacidad conduce a un aumento de la congestión del tráfico. Esta no sólo conlleva los costos asociados a la espera en un atasco automovilístico o en una cola formada en un semáforo, sino que también implican aumento del consumo de

combustible, de la contaminación, problemas de salud, estrés y malestar, entre otros. Además, la congestión vehicular retarda el movimiento de mercancías y de servicios, de modo que puede llegar a inducir un aumento del precio de los productos y una reducción de la competitividad de los negocios. Estas son consideraciones que exigen el establecimiento de algún mecanismo que permita mejorar la gestión del tráfico urbano, tal vez aumentando de alguna forma la capacidad de las rutas. Este será el objetivo de esta tesis, enfocado su aplicación a la ciudad de Ambato.

## **1.2. Descripción de Ambato**

La ciudad de Ambato está ubicada a 128 Km. al sur de la ciudad de San Francisco de Quito, en el centro de Ecuador, en medio de la Cordillera de los Andes, rodeada de volcanes y nevados como el Tungurahua, el Chimborazo y el Carihuayrazo. Se encuentra enclavada en una hondonada formada por seis mesetas: Pillaro, Quisapincha, Tisaleo, Quero, Huambaló y Cotaló. Se asienta sobre un sistema de terrazas en diferentes niveles con una topografía irregular, atravesada por el río de su mismo nombre.

Por lo que respecta a su arquitectura, la ciudad de Ambato es relativamente nueva, ya que tuvo que ser reconstruida en varias ocasiones debido a los fuertes movimientos sísmicos que ha sufrido. En particular, el terremoto de 1949 fue desastroso para la ciudad, destruyendo la mayor parte de la infraestructura urbana por lo que, en la actualidad, existen pocos edificios antiguos y patrimoniales. El Gobierno Nacional se encargó de reconstruir la ciudad, implementando una red vial con las dimensiones necesarias para el tráfico de aquel momento. La malla vial fue diseñada en forma de cuadrícula para superar los obstáculos topográficos existentes.

Según datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censo INEC (2015a), publicados en el año 2001, la población del cantón de Ambato era de 287.282 habitantes. En el 2010 fue de 329.856 personas, habiéndose pronosticado que en el año 2015 habría 356.009 personas y, para el 2020, 387.309 habitantes, INEC (2015b) en un territorio de apenas 909,1 km<sup>2</sup>.

En el año 2009, la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) definió las ciudades que servirán como sedes administrativas de las siete regiones creadas para reorganizar la gestión de la Función Ejecutiva. En este contexto, Ambato pasó a ser la capital de la Región 3, que corresponde a la unión de las provincias centrales del Ecuador: Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Pastaza.

## **Economía y Comercio**

Ambato se caracteriza por ser una ciudad de gran actividad comercial en el contexto nacional. Posee un intenso comercio, sobre todo los lunes, lo que intensifica el tráfico vehicular en varios sectores. Además, es un motor industrial y comercial de gran importancia para la economía del centro del Ecuador, gracias a las industrias que se encuentran en la ciudad y sus alrededores.

El principal centro de suministro de alimentos es el Mercado Mayorista. Desde este centro se distribuyen al resto de mercados minoristas de la ciudad, provincia, cantón y a la Amazonía, bienes de consumo de primera necesidad como abastos, frutas, verduras, etc. Entre diciembre y abril de todos los años, Ambato produce una gran cantidad de fruta, lo que intensifica la cantidad de vehículos que se movilizan por la ciudad para transportar a los diferentes mercados del país. Además, se encuentra la Corporación de Empresas del

Parque Industrial Ambato (CEPIA), con un sector industrial muy variado y un importante volumen de producción.

## **Infraestructura de transporte**

Ambato cuenta con una red de carreteras que la unen con las poblaciones cercanas de su provincia. También se encuentra bien comunicada con las principales ciudades de país, entre ellas, la capital del país, Quito, y con Guayaquil, principal puerto de Ecuador. Ambato es una de las ciudades con mayor número de taxis del país con un promedio de dos taxis por cada 100 habitantes, (Acevedo, 2011) siendo la forma más cómoda y rápida de transporte. Además, cuenta con una gran cantidad de autobuses (cinco líneas urbanas y tres rurales) que abarcan todos los rincones del área urbana, que se conectan fácilmente con las zonas comerciales y de ocio.

### **1.3. El tráfico en Ambato**

La mala fluidez del tráfico urbano es uno de los problemas que más influye en la calidad de vida de sus residentes. Se ha acentuado en las últimas décadas por una serie de factores simultáneos: la geografía de la urbe, la creciente presencia de automóviles particulares, la concentración de entidades públicas y privadas en importantes zonas de la ciudad, la actividad comercial y la concentración de centros educativos, entre otros. Todos estos factores complican el tránsito vehicular, motivo por el cual el Cabildo Municipal ha comenzado un estudio para implementar un sistema de transporte público masivo y decidir si éste puede operar en conjunto con los actuales autobuses de transporte público.

En el año 2007, el Municipio de Ambato asumió las competencias de administración del transporte por la Ley de Competencia del Tránsito (Registro Oficial, número 1002).

Desde ese momento, se aplican distintos proyectos que han mejorado la circulación peatonal y vehicular, además de haberse incrementado la señalética, tanto horizontal como vertical. Así, para la Dirección de Tránsito y Movilidad de Ambato (DTM), la prioridad actual es solucionar los problemas ocasionados por el incremento de los vehículos particulares.

En efecto, los trabajos del INEC han permitido apreciar un incremento muy importante de vehículos en los últimos años, véase Tabla 1.1, en la que se observa que, en el periodo de 13 años, se ha incrementado más del 165 %. Las cifras representadas se refieren a todo el Ecuador, pero la situación es similar en Ambato.

| Años | Número de vehículos motorizados matriculados |
|------|--|
| 2000 | 646.040                                      |
| 2001 | 621.181                                      |
| 2002 | 663.231                                      |
| 2003 | 723.176                                      |
| 2004 | 764.086                                      |
| 2005 | 867.666                                      |
| 2006 | 961.556                                      |
| 2007 | 920.197                                      |
| 2008 | 989.039                                      |
| 2009 | 905.651                                      |
| 2010 | 1.171.924                                    |
| 2011 | 1.355.120                                    |
| 2012 | 1.509.458                                    |
| 2013 | 1.717.886                                    |

Tabla 1.1. Vehículos motorizados matriculados en Ecuador hasta el año 2013. INEC. (2015b)

Una de las medidas propuestas se enfoca a la optimización de la gestión de tráfico mediante la semaforización centralizada. Así, el Plan de Ordenamiento Territorial de Ambato, proyectado para 2020, pretende que el centro de la ciudad sea más transitable para peatones y se use principalmente transporte público. Además, en el año 2009 entró

en funcionamiento un aparcamiento tarifado, para unos 5.000 vehículos (Municipio de Ambato, 2009).

Según registros de la Agencia Nacional de Tránsito de Tungurahua, se matricularon 25.510 automóviles en 2006 en la ciudad de Ambato. En el año 2011, la cifra subió a 50.000 unidades, incluyendo 400 autobuses, 3.500 taxis, 2.000 camionetas, correspondiendo el resto a vehículos particulares, como se observa en la Figura 1.1. En el año 2012, se matricularon 67.000 vehículos, es decir, casi un 15 % más que el año anterior.

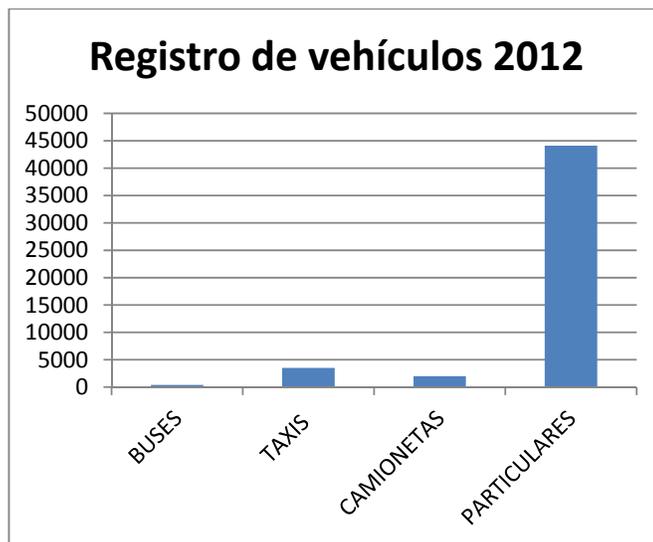


Figura 1.1. Cantidad de vehículos en Ambato en el año 2012

Como hemos mencionado, Ambato es el centro de comercio de toda la provincia de Tungurahua, por lo que circulan vehículos matriculados en los cantones vecinos, especialmente los días de comercio. Según la DTM, en el año 2012, de los 50.000 automóviles que circulaban por la ciudad, el 88.2% eran particulares, que son los que generan los mayores problemas de tráfico. El uso de coche propio ha aumentado, especialmente en el casco urbano, conformando el 74% de los viajes diarios.

En estudios previos, véase Solórzano (2008), se señalaba que se producen problemas de congestión y flujo vehicular alrededor de los terminales y paradas de autobuses. Por ello, se ha remodelado prácticamente la estructura física del terminal principal, en Ingahurco, habiendo mejorado el flujo vehicular para brindar un mejor servicio a los usuarios.

Además, en la actualidad, el crecimiento poblacional y, consecuentemente, el incremento de edificaciones, está cambiando las tendencias de construcción horizontal a vertical, se presentan así importantes inconvenientes de tráfico, tardándose mucho más tiempo en realizar los recorridos, en especial, en el centro de la ciudad.

Para obtener información sobre el tráfico del casco urbano, realizamos entrevistas al Jefe de DTM y algunos de sus colaboradores. Las respuestas en estas entrevistas manifestaron que la congestión se da por la alta tasa de medios de transporte privado que circulan por las calles y avenidas, que no fueron diseñadas para soportar el volumen de tráfico hoy existente, yendo en aumento, cada año, el problema. A esto se añade la semaforización actual, implementada con elementos estáticos y más aún, no respetada generalmente por los conductores. Todo ello hace que la actual configuración de tráfico resulte inadecuada para el volumen de vehículos y personas que circulan diariamente.

A continuación se explican, detalladamente, los problemas de tráfico que han surgido como consecuencia del crecimiento poblacional y la expansión de la ciudad, determinados a partir de las entrevistas mencionadas.

- Las instituciones que poseen las competencias de tránsito, no disponen de un programa de educación y seguridad vial que contribuya a la formación en esta materia de la ciudadanía. Por tanto, existe desconocimiento y, en consecuencia, no se acatan

las Leyes de Tránsito, Transporte y Seguridad Vial, por parte de todos los actores viales (conductores, peatones, vendedores ambulantes, etc.).

- La Dirección de Tránsito y Movilidad de Ambato emite resoluciones, ordenanzas y reglamentos para aplicar en la ciudad, pero tiene el inconveniente de no disponer de suficiente personal para hacer cumplir tales normas.
- Anteriormente, no estaban autorizados edificios de más de tres pisos de altura. Sin embargo, desde el año 2009, con el Plan de Ordenamiento Territorial de Ambato 2020, se cambió la normativa de construcción a seis plantas. Como consecuencia de ello, existe mayor concentración de personas y automóviles, causando problemas de congestión y saturando la capacidad de las vías.
- La Dirección de Tránsito y Movilidad ha priorizado el tránsito de peatones. Por ello, existe la necesidad de aumentar el ancho de las aceras, reduciendo significativamente el tamaño de la calzada, con lo que no hay espacio suficiente para la circulación de vehículos.
- Los locales comerciales con acceso a las vías emplean la calzada como área de carga y descarga de productos. En consecuencia, el flujo vehicular se detiene, produciéndose un incremento del tiempo de recorrido entre dos puntos, especialmente en las horas de mayor congestión.
- Los sentidos o direcciones de circulación de las vías están asignadas sin ningún estudio previo que sustente técnicamente los flujos de movilidad.
- No existen espacios ni infraestructura adecuada para las personas con capacidades especiales. Para ello, hay que crear estos espacios, lo que, de nuevo, también reduce el ancho de la calzada.
- No existe infraestructura adecuada ni suficiente para el aparcamiento de vehículos en lugares públicos.

- Debido a su geometría, en las vías no se dispone de espacio suficiente para ubicar señaléticas y semáforos por encontrarse ocupadas por instalaciones eléctricas, telefónicas y de publicidad.
- Las instituciones de servicio público y privado, como son el Gobierno Municipal, el Consejo Provincial, la Empresa Eléctrica, las compañías telefónicas, los bancos y las principales instalaciones deportivas, están ubicadas en el centro urbano. Se contribuye así a la congestión, puesto que sus empleados disponen de vehículos privados y tienden a usarlos en horas punta.
- El servicio de transporte público dispone de frecuencias con rutas diarias. Sin embargo, el desorden del tráfico suele alterar dichas planificaciones, por lo que los conductores frecuentemente toman la decisión de crear su propia ruta, cambiándola arbitrariamente, con el consiguiente caos que conlleva.
- Para el desarrollo de futuros proyectos en tráfico, no se dispone de información actualizada de la ciudad, lo que exigiría generar una infraestructura de captación de información moderna y eficiente.

Como consecuencia del trabajo anterior realizado en mi tesis de máster Aldás (2011), que completa las observaciones de la DTM, se identificaron las zonas de más conflicto y congestión vehicular de la ciudad que resultaron ser, véase el mapa de la Figura 1.2.

1. Las avenidas Indoamérica y Pedro Vasconez, donde está situado el intercambiador de tráfico de Izamba;
2. La intersección de las avenidas Atahualpa y Víctor Hugo, sector del Mall de los Andes;
3. La intersección de las avenidas Atahualpa y los Shyris;
4. Rotonda del Estadio Bellavista;

5. Rotonda del Servicio Ecuatoriano de Capacitación (SECAP);
6. Rotonda de Huachi Chico. En este sector no existen paradas de buses señaladas para el transporte interprovincial e intercantonal, lo que dificulta la movilidad de los vehículos, pues los autobuses realizan las paradas de modo indiscriminado.
7. La intersección entre la avenida Rodrigo Pachano, la calle Lalama y la calle Montalvo. Hace poco tiempo se cambió de rotonda a un distribuidor de tráfico, controlado por un sistema semafórico que, eventualmente, deberá cambiarse por pasos subterráneos o elevados;
8. La intersección del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) entre la avenida Rodrigo Pachano Lalama y la avenida Los Guaytambos, en donde no existe suficiente señalización vial;
9. La Rotonda del Mercado Mayorista;
10. La Rotonda de Cumandá;
11. La intersección de la avenida 12 de noviembre y calle Eugenio Espejo;
12. La Y de la calle 13 de Abril y calle Juan León Mera;
13. El casco central urbano de la ciudad, limitado al sur por la calle Francisco Flor, al norte por la calle González Suárez, al oeste por la calle Lizardo Ruíz, y al Este una parte por la avenida 12 de Noviembre y la calle Olmedo;
14. Los estacionamientos tarifados en las calles son elementos de conflicto de flujo de tráfico, ya que al ocupar uno de los carriles de la vía se reduce la capacidad de la misma.
15. Los alrededores de los terminales de autobuses existentes, Ingahurco, de las Américas, Píllaro y Pasa, se ubican en zonas inadecuadas y sin estudio previo dentro del casco urbano. Las áreas circundantes se encuentran totalmente saturadas de

vehículos, principalmente porque las unidades de transporte público incumplen los horarios de las frecuencias establecidas.

En la ciudad de Ambato se usa en gran escala el transporte privado, bien el automóvil propio, bien el personalizado público de alquiler de taxi. Además, existen camiones privados que ingresan al centro de la ciudad con abastos para los mercados. El transporte público de movimiento masivo, que es el autobús, tiene rutas por las calles y avenidas del casco urbano y está obligado a movilizar usuarios de una estación a otra, respetando políticas establecidas por la institución reguladora. Sin embargo hay escasa conciencia entre los usuarios por emplear el transporte público, ya que el cliente desea que el autobús preste sus servicios, si es posible, hasta la puerta de su domicilio, dejando de lado las paradas obligatorias o reguladas.

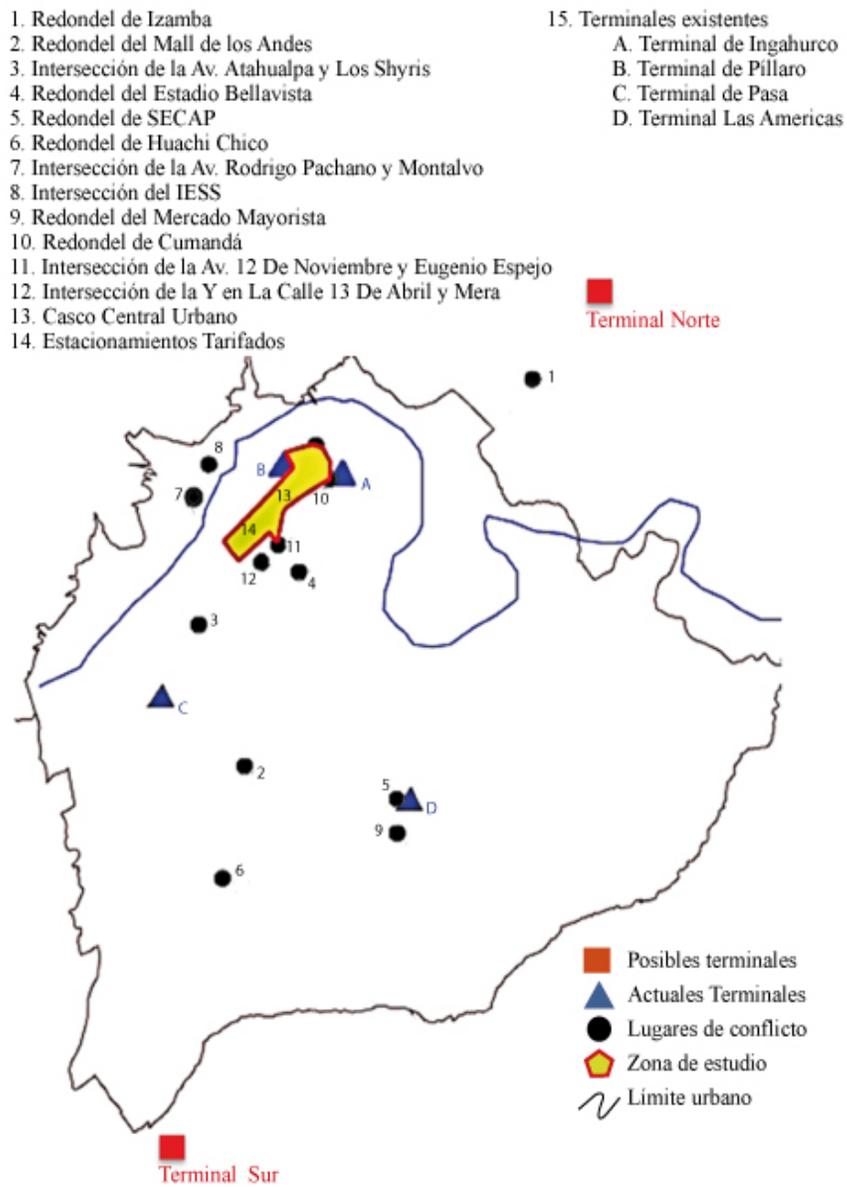


Figura 1.2. Mapa de localización de puntos de conflicto en la ciudad de Ambato.

#### **1.4. Algunas alternativas planteadas hasta el momento**

Como introducción, y muestra de interés por parte de las autoridades de Ambato por mejorar el problema de tráfico, se indican dos medidas de reciente implantación para su solución.

- *Sistema de semaforización centralizada*

En el año 2015 se ha comenzado a desarrollar un sistema de semaforización centralizado de tránsito en Ambato. Este sistema pretende realizar varios estudios y dar alternativas a problemas existentes respecto al tráfico en el casco urbano. Los datos obtenidos son volúmenes de tráfico de ingreso y salida de vehículos en las diferentes intersecciones viales. Sin embargo, hasta el momento no ha surgido ningún estudio, basado en tales datos, como sería de desear.

Para el control y mantenimiento de los semáforos, la Dirección de Tránsito y Movilidad ha creado tres áreas y, con ello, superar los inconvenientes actuales: a ) transporte, b ) tránsito, c ) atención al cliente.

- *Normativas de tránsito*

En el Registro Oficial con número 1002, 2 de Agosto de 1996, se publicó la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial para que el gobierno autónomo descentralizado de la Municipalidad de Ambato dé cumplimiento a las normas de señalética horizontal y vertical a través de la Dirección de Tránsito y Movilidad.

Además, por decreto constitucional, se aprobó en el año 2009 el Reglamento General para la aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial.

## 1.5. Objetivos de la tesis

Nuestro interés en esta tesis está en estudiar el problema de la expansión de la capacidad de tráfico para determinar acciones encaminadas al cambio y evolución que promuevan una solución de las necesidades de los usuarios, dirigidas a mitigar la congestión del tráfico en una ciudad. Así, el objetivo de esta tesis es diseñar una metodología que permita expandir la capacidad de tráfico de una red urbana de manera óptima. Tal metodología se aplicará en la ciudad de Ambato para aportar soluciones al grave problema de tráfico que se presenta en la actualidad. Tal objetivo general se refleja en los siguientes objetivos específicos:

- Introducir un método de estimación de los flujos origen destino O-D en una red urbana a partir de las mediciones de volúmenes de tráfico.
- Introducir un modelo estocástico sobre los flujos O-D, que permita la simulación de tráfico bajo distintas condiciones.
- Introducir esquemas que permitan detectar rutas O-D críticas en una red urbana.
- Introducir una metodología de simulación que permita identificar las mejores intervenciones de cara a mitigar los problemas en los flujos O-D críticos.
- Aplicar la metodología anterior para resolver los problemas de tráfico en la red de Ambato.

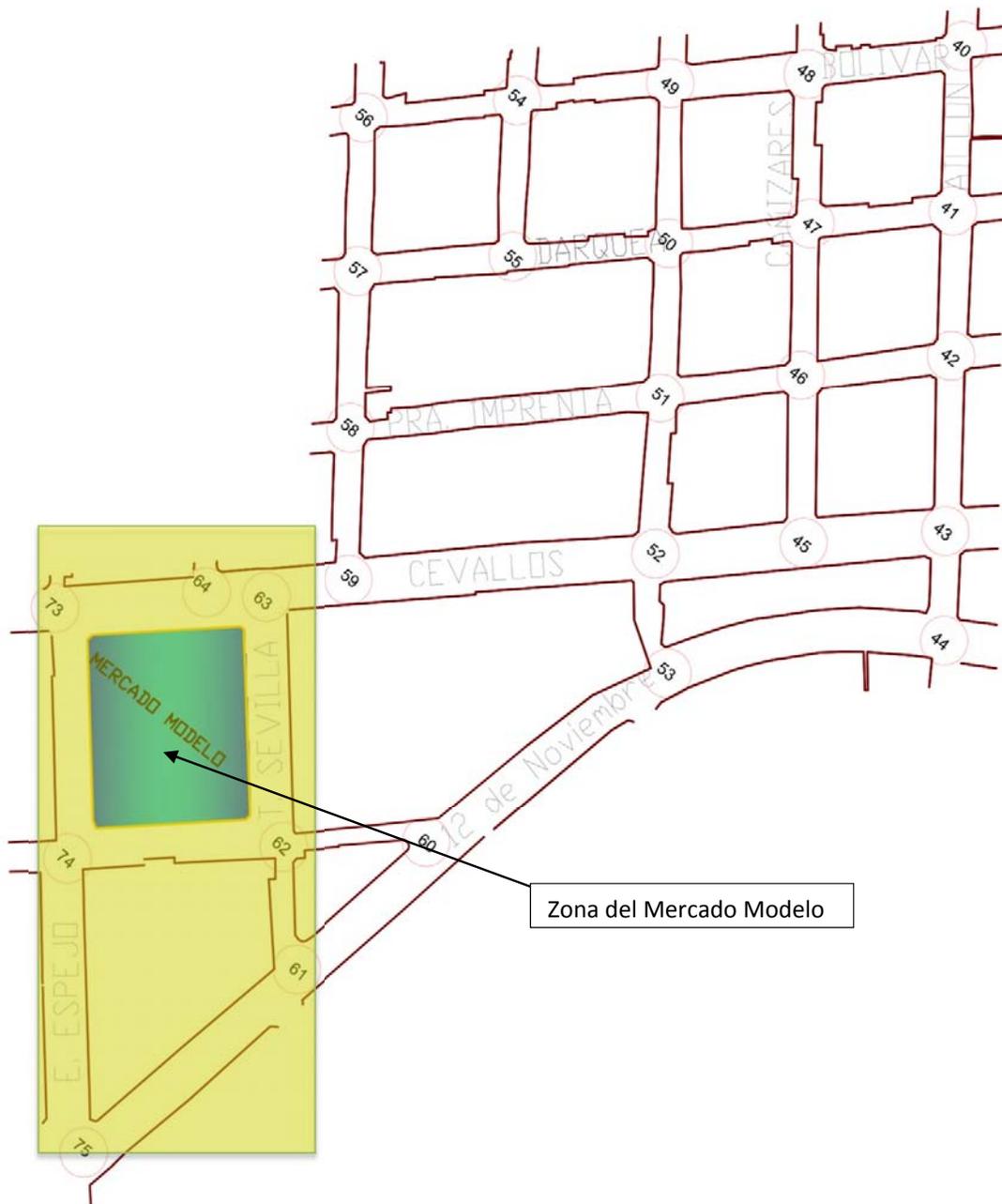


Figura 1.3. Plano de la zona de estudio de la ciudad de Ambato, correspondiente al Mercado Modelo.

Para ilustrar los conceptos y métodos, hemos escogido una zona que se presenta en la Figura 1.3 con las intersecciones de las calles y avenidas que circundan el Mercado Modelo, en la que se produce una de las mayores congestiones vehiculares de toda la ciudad. Esta zona se describe como un grafo, con nodos (intersecciones) y arcos dirigidos (sentido de tráfico). Las intersecciones son puntos de conteo vehicular. Estas calles se encuentran estrechamente relacionadas entre sí, ya que son entradas y salidas de vehículos del casco urbano. Se corresponde a un parte de la zona problemática # 13 de la figura 1.2.

Al mismo tiempo, circula por el sector una gran cantidad de líneas de transporte público, lo que ahonda más el problema de congestión vehicular. Los usuarios del transporte público contribuyen a la ralentización del flujo de tráfico, porque para bajar o subir a un vehículo no utilizan las áreas designadas como paradas. Esto incrementa la pérdida de tiempo de los vehículos que están en movimiento. Por estos motivos, se ha elegido como zona de estudio el área limitada del casco central.

Una vez establecida la zona y los factores críticos, se han definido rutas de servicio de tráfico vehicular en el casco urbano. Cada intersección vial se representa mediante un nodo, que hemos numerado, aplicando un criterio de norte a sur y de este a oeste. Una vez definido el número de nodos, diseñamos las posibles rutas de tráfico que consideramos las once más relevantes en el casco urbano de la ciudad de Ambato, según se ilustra en la Tabla 1.2. Esta incluye los nodos inicial y final y una descripción del problema principal detectado en la ruta correspondiente.

| CUADRO DE RUTAS DEL TRÁFICO EN AMBATO |   |              |            |
|---------------------------------------|---|--------------|------------|
| RUTA                                  | DESCRIPCIÓN   | NODO INICIAL | NODO FINAL |
| 1                                     | BUSES URBANOS DE TRANSPORTE PÚBLICO   | 44           | 75         |
| 2                                     | AUTO LIVIANO TRÁFICO PRIVADO  | 44           | 73         |
| 3                                     | INGRESO AL MUNICIPIO  | 40           | 56         |
| 4                                     | BOMBEROS HASTA LA INTERSECCIÓN DE LA CALLE ESPEJO Y DOCE DE NOVIEMBRE                 | 40           | 75         |
| 5                                     | REDONDEL DE CUMANDA HASTA EL MUNICIPIO  | 44           | 56         |
| 6                                     | DESDE INTERSECCIÓN CALLE SUCRE Y CASTILLO HASTA CENTRO DE ACOPIO LA FERROVIARIA       | 73           | 43         |
| 7                                     | INTERSECCIÓN DE LA CALLE TOMAS SEVILLA Y BOLIVAR HASTA EL REDONDEL DE CUMANDA         | 56           | 44         |
| 8                                     | INTERSECCIÓN DE LA CALLE MARTÍNEZ Y JUAN B. VELA HASTA LA CALLE BOLÍVAR               | 62           | 56         |
| 9                                     | EN LA CALLE TOMAS SEVILLA DESDE LA JUAN B. VELA HASTA LA BOLIVAR                      | 49           | 60         |
| 10                                    | CALLE TOMAS SEVILLA Y JUAN B. VELA HASTA EL CENTRO DE ACOPIO FERROVIARIA              | 62           | 43         |
| 11                                    | INTERSECCIÓN DE LA AV. 12 DE NOVIEMBRE Y ESPEJO HASTA EL CENTRO DE ACOPIO FERROVIARIA | 75           | 43         |

Tabla 1.2. Cuadro de las rutas del tráfico en Ambato del casco urbano. Elaboración propia

## 1.6. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la situación del tráfico en Ambato, como ejemplo que nos permitirá ilustrar la metodología de expansión de tráfico a desarrollar en esta tesis. Tras una contextualización socio-geográfica de la ciudad se han revisado sus principales problemas de tráfico y sugerido posibles causas. Además, se han descrito algunas de las medidas adoptadas por el Municipio para paliar este problema. Se ha identificado también una zona especialmente complicada en lo que respecta al tráfico que servirá para ilustrar los métodos que introduciremos para estimar flujos O-D de tráfico e identificar áreas conflictivas y, después, resolver los problemas identificados.

El resto de la tesis se estructura como sigue:

- En el capítulo 2, planteamos el estado del arte en relación, principalmente, con las metodologías para realizar estimaciones de la matriz de flujos O-D.
- En el capítulo 3, se plantea una aproximación para resolver el problema de estimación de flujos O-D vehiculares. Para obtener la solución, se desarrolla un método que emplea algoritmos genéticos (AG).
- En el capítulo 4 se introduce un modelo de simulación que permite evaluar las contramedidas de mejora de tráfico e identificar las más adecuadas, de cara a reducir el problema de congestión, aumentando la capacidad.
- En el capítulo 5 se describen las conclusiones y recomendaciones a las que se han llegado durante esta investigación, así como se identifican algunos problemas abiertos.

Se concluye con dos anexos.

## Capítulo 2

# Análisis crítico de estimación de modelos de flujos de tráfico

### 2.1. Introducción

En este capítulo describiremos algunos de los principales modelos sobre flujos de tráfico. Para ello, se revisarán algunas técnicas relevantes de gestión de flujos vehiculares en redes. También se ofrecen algunas definiciones en relación con el problema origen destino o problema de la matriz origen-destino O-D y sus principales características. Estas tareas servirán, más adelante, para diseñar una serie de contramedidas y agilizar el tránsito.

La mayoría de modelos que considereremos incluirán un grafo. Los nodos del grafo se asimilarán a intersecciones de vías y las aristas a tales vías. En el grafo se identifican recorridos de tráfico vehicular que tienen direcciones determinadas y que son las denominadas rutas, de forma que emplearemos grafos dirigidos.

El flujo de vehículos en una red urbana presenta aspectos relevantes que justifican un tratamiento más elaborado que la coordinación de un conjunto de arterias viales. Por tanto, haremos una breve revisión de algunas técnicas y modelos relevantes para el problema que nos ocupa. El conductor o usuario de una ruta, al circular por ella, debe considerar factores de coste, tiempo, seguridad y comodidad, buscando rutas cortas con flujos de tráfico bajos desde un nodo inicial hasta uno final, que se denominarán origen y destino.

En el estado de arte de los modelos de flujo de tráfico, un problema principal es el de estimación de la denominada matriz O-D. Dada su relevancia en la metodología que propondremos, revisaremos alguno de los métodos principales para realizar esta tarea.

## **2.2. Algunos conceptos y modelos de gestión de tráfico en redes**

### **Definición y principios básicos en redes para gestión de tráfico**

Una red vial es un conjunto de calles y avenidas que se cruzan en intersecciones. Estas pueden ocurrir a nivel o desnivel, véase la Figura 2.1. Los conceptos de camino, trayectoria y circuito que se registran en una red urbana son bien conocidos (Taha, 2004) en este tipo de estudios. En general, los tramos de calles o avenidas tendrán un cierto sentido de circulación.

La estructura subyacente que se empleará en nuestros problemas está basado en grafos. Un grafo es un conjunto de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamados aristas, que pueden ser orientados o no. Los puntos representan a las intersecciones de las vías. Las aristas son los distintos tipos de conexiones entre puntos, véase Taha (2004).



Figura 2.1. Imagen de calles y avenidas de la zona del casco urbano de Ambato. Fuente: Google maps

## Modelos para el análisis de tráfico

El comportamiento del tráfico se puede representar a través de modelos matemáticos que, en general, se refieren a fases:

- *Fase de generación de viajes.* Es una etapa inicial en la que se buscan datos relativos al tráfico de la zona de interés. Estos datos tienen información sobre actividades económicas, distribución social, recursos educacionales o los espacios para compras, entre otros, que pueden ayudar a estimar el número total de viajes.
- *Fase de distribución.* Una vez definidos los lugares de los viajes, se crea la matriz de viajes origen-destino O-D, que es una matriz representada por ceros y unos. Un 1 indica que el par O-D se considera como ruta y 0 en otro caso.
- *Descomposición modal.* En esta fase se produce la adjudicación de viajes entre los distintos medios de transporte. Después se obtienen las matrices origen destino O-D para cada modo, contabilizándose el número total de viajes por cada nodo.

- *Asignación.* Es necesario después la asignación de los viajes a la red de tráfico.

La diversidad del comportamiento de los seres humanos hace imprescindible buscar un principio que facilite el tratamiento del problema de flujos, fundamental en los modelos de tráfico. Wardrop (1952) estableció formalmente este principio: *“Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se organiza en redes congestionadas de modo que ningún vehículo pueda reducir el tiempo de viaje a través de un cambio de ruta,”* que se relaciona con las condiciones de equilibrio de Nash en un problema de teoría de juegos.

Este principio se ha usado como punto de partida para confeccionar los denominados *modelos de asignación en equilibrio*. Un corolario de este principio es que si todos los viajeros perciben el tiempo de los viajes del mismo modo, bajo condiciones de equilibrio, todas las rutas empleadas entre un par origen destino tienen el mismo tiempo mínimo, mientras que las no empleadas requieren un tiempo igual o mayor. Beckman (1955), por su parte, formula el problema de doble asignación de tráfico con demanda elástica, para expresar las condiciones de equilibrio que se derivan del primer principio de Wardrop, cuando analizamos el nivel de uso de los diferentes arcos en la red. Estos estudios pueden usarse como dato inicial en la construcción de nuevas vías o para determinar la capacidad de flujo vehicular en una ruta.

### **Modelos de estimación de flujos de tráfico**

Cada usuario de la red vial toma la decisión que cree conveniente para llegar a su destino, eligiendo la mejor ruta según la información que posea en ese instante. Esto puede implicar la consideración de factores como coste, tiempo, seguridad y/o comodidad. El usuario debe decidir qué ruta recorrer y qué modo de transporte utilizar, lo que depende,

entre otras cosas, de la congestión en los arcos o vialidades de la ruta, siendo un problema difícil de resolver.

La estimación de flujos sirve tanto para describir el tráfico, como para predecir o recomendar un patrón de flujo vehicular en una red. Para ello, por ejemplo, pueden emplearse los modelos de Castillo et al (2008) o Tebaldi y West (1998), que representan el comportamiento macroscópico del tráfico en grandes zonas urbanas o ciudades enteras. Mediante estos modelos es posible estimar los flujos vehiculares en una red en la que existe cierta demanda de viajes y en donde los efectos de la congestión producen que los tiempos de viaje en los arcos dependan de hecho de los flujos.

En las últimas dos décadas, se ha dedicado mucha atención a la búsqueda de métodos para resolver el problema de flujo de tráfico, aplicando el modelo de la matriz origen destino a partir de mediciones de flujos de tráfico. Así, véase Yang (1992); Vardi (1996); Maher, (1999); Hazelton (2003); Tebaldi y West (1998); Sun (2006); Castillo et al. (2006), entre otros. Por su relevancia en nuestro problema describimos estos modelos en cierto detalle en la sección 2.3.

### **Asignación de usuarios**

Inicialmente, se pueden clasificar los modelos de asignación de usuarios en dos tipos: el de equilibrio de usuario estocástico (SUE) y el de equilibrio de usuario determinístico (DUE).

En la primera clase, los costes de usuario se consideran como variables aleatorias y la selección de rutas puede ser diferente para distintos usuarios. Además, se supone que todos los usuarios tienen información perfecta sobre los costes de los itinerarios y viajan

usando las rutas de menor coste. Entre los modelos SUE propuestos están los de Praskher (2004), Sheffi (1985) y Daganzo (1977), que fueron los primeros que definieron el concepto SUE, y usaron distintas técnicas basados en el modelo logit multinomial simple (MNL) o el modelo probit multinomial (MNP). En general, el equilibrio se alcanzará cuando ningún viajero crea que su tiempo de viaje puede mejorar cambiándose unilateralmente rutas, de nuevo con consecuencias del concepto de equilibrio de Nash.

El problema de asignación de usuarios se ha abordado con diversas técnicas como el control óptimo y la optimización, Verastegui (2011). Los distintos modelos consideran que los usuarios minimizan sus tiempos de viaje actualizando continuamente sus rutas, elegidas según sean las condiciones del tráfico. El problema es especialmente importante en los sistemas avanzados de información al viajero o *Advanced Traveler Information Systems* (ATIS) (Verastegui, 2011), cuyo objetivo es mejorar el comportamiento del tráfico para reducir la congestión. En estos sistemas, existe un controlador central que recomienda las rutas a los usuarios en tiempo real, satisfaciendo objetivos individuales o del sistema y considerando las variaciones inesperadas en las condiciones de la red.

Otra tecnología recientemente incorporada al análisis de flujos vehiculares en redes es la de los sistemas de información geográfica para transporte, véase Levinson (2003). La representación y el análisis de redes de tráfico ha mejorado con el desarrollo de estos sistemas, porque a una representación topológica de la red le podemos acotar una representación geográfica. Resulta importante que los análisis de redes pueden combinarse con análisis, espaciales, que tengan en cuenta características del territorio, tales como uso de suelo, crecimiento del área urbana y datos de atributos demográficos o socioeconómicos. Así, surge la posibilidad de crear escenarios que consideren cambios en la infraestructura vial o en la demanda.

## Grado de saturación

Los impactos urbanos y ambientales asociados al tráfico están, en gran medida, altamente relacionados con una variable que conecta el grado de saturación ( $GS$ ) de cualquier vía, intersección o red. Tal grado de saturación se define como la razón entre el flujo que usa el dispositivo ( $q$ ) y su capacidad ( $Q$ ), es decir,

$$GS = q/Q. \quad (2.1)$$

Varios estudios, como el de Akcelik (1981), al de IHT (1997), indican que el fenómeno de congestión comienza a producirse para valores de  $GS$  en torno a 0,7.

Esto puede constatarse gráficamente en la Figura 2.2, en la que se muestra la evolución de uno de los índices de congestión que representa la demora en un cruce en función del grado de saturación, véase Fernández (2004) que realizó su estudio en Santiago de Chile. Como puede apreciarse, la variable de interés, la demora, es función monótona creciente del grado de saturación, creciendo la pendiente considerablemente en torno a los valores de saturación 0,7.

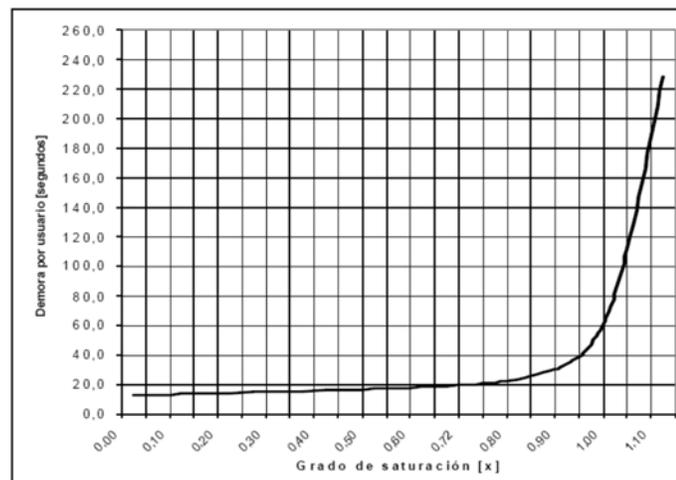


Figura 2.2. Grado de saturación en un cruce. Fernández. (2004)

## **Modelos de predicción de tráfico**

Se han considerado también modelos de predicción de flujo de tráfico con distinto grado de complejidad. Una aproximación habitual (Head & Larry, 1995) se basa en modelos ARIMA de series temporales, ARIMA estacionales (Williams & Hoel, 2003), (Lee & Fambro, 1999). Otros modelos que se han empleado, incluyen filtros de Kalman, Okutani y Stephanedes (1984), redes neuronales (Castillo, y otros, 2002), simulación de tráfico vehicular (Banks, 1998) y (Barceló, 2010), modelos de regresión local (Willumsen, 1978), combinación de mapas de Kohonen y modelos ARIMA (Van Der Voort, Dougherty, & Watson, 1996), y cadenas de Markov, Vardi (1996), entre muchos otros.

### **2.3. Modelos de estimación de flujo de tráfico**

En esta sección consideraremos los principales métodos de estimación de la matriz O-D para el estudio de los modelos de tráfico. Comenzaremos planteando matemáticamente el problema a resolver. Más tarde se describen los principales métodos para su solución. Servirán de base para el método que introduciremos en el capítulo 3.

#### **2.3.1. Modelo de flujos O-D de tráfico**

Consideramos una red con  $r$  arcos y  $c$  pares O-D. Dadas las observaciones o conteos  $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_r)$  de tráfico en los arcos, intentamos predecir los flujos O-D de tráfico  $X=(X_1, \dots, X_c)$  en todos los pares origen destino. Ambas cantidades están relacionadas mediante

$$Y= AX, \tag{2.2}$$

donde los elementos de la matriz  $A$  se definen mediante

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el enlace } i \text{ forma parte de la ruta } j \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Además los flujos O-D deben satisfacer las restricciones de no negatividad

$$X_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, c. \quad (2.3)$$

Obsérvese que, habitualmente, habrá más pares O-D que enlaces con datos disponibles, *i. e.*,  $c > r$ . Esto hace que el problema de estimación de  $X$  no esté bien definido.

En lo que sigue describiremos algunos de los métodos principales para estimación de los flujos O-D.

### 2.3.2. Modelo de Vardi

El modelo de Vardi (1996) permite resolver el problema de estimación de la intensidad de tráfico nodo a nodo, con mediciones repetidas sobre los enlaces de una red. Para ello, se hacen hipótesis de distribución de Poisson sobre el tráfico. Se consideran, además, dos tipos de tráfico sobre los arcos: determinista, con una trayectoria fija, conocida, entre cada par de nodos; y markoviana, con una ruta de acceso aleatorio entre cada par, determinados de acuerdo a una cadena de Markov fija para ese par.

Así, Vardi (1996) adopta la ecuación (2.2), usando el modelo  $Y^{(k)} = AX^{(k)}$ , donde  $Y^{(k)}$ , designa los vehículos en los arcos y  $X^{(k)}$ , son los vehículos en las rutas O-D, en el instante  $k$ ,  $k = 1, \dots, K$ . Se supone que

$$X_j^{(k)} \sim Po(\lambda_j), j = 1, \dots, c, k = 1, \dots, K,$$

que son variables aleatorias independientes entre sí.

Para estimar el modelo utiliza el método de máxima verosimilitud, empleando el algoritmo EM. Maher y Zhang (1999).

### 2.3.3. Modelo de Tebaldi y West (TW)

Tebaldi y West (1998) estiman el tráfico entre todos los pares de la matriz O-D de una red de tráfico, considerando, de nuevo, los casos de rutas fijas y aleatorias, respectivamente. Puede verse como una versión bayesiana del modelo de Vardi (1996) antes expuesto, de manera que el objetivo del modelo es estimar  $X$  a partir de los datos  $Y$ , empleado la estructura dada en (2.2) y (2.3). Como hipótesis básica, consideramos que las rutas  $X_a$  tienen distribución de Poisson con parámetro  $\lambda_a$ , e independientes entre sí. Para facilitar el trabajo, se acude a una transformación de  $A$ , escribiéndola en la forma  $A = (A_1, A_2)$ , con  $A_1$  matriz  $r \times r$  invertible, y  $A_2$  matriz de tamaño  $r \times (r - c)$ .  $A_1$ , por ejemplo, puede calcularse con el método de descomposición QR. De forma análoga, se reescribe  $X$ , como  $X = (X_1, X_2)$ , de manera que se tiene la siguiente estructura:

$$Y = (A_1, A_2) \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = A_1 X_1 + A_2 X_2,$$

de donde se obtiene:

$$X_1 = A_1^{-1}(Y - A_2 X_2). \tag{2.4}$$

Si designamos mediante  $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_c)$  al vector de medias de los flujos de tráfico a priori, entonces, usando la fórmula de la probabilidad condicionada y el teorema de Bayes, resulta:

$$\begin{aligned}
p(X|\Lambda, Y) &= p(X_1, X_2|\Lambda, Y) \\
&= p(X_1|X_2, \Lambda, Y) p(X_2|\Lambda, Y).
\end{aligned}
\tag{2.5}$$

Se observa que se debe estimar  $p(X_1|X_2, \Lambda, Y)$  empleando (2.4).

Para proceder a la estimación se plantea la siguiente estrategia de muestreo MCMC, donde, dado  $X_i$  en  $X_2$ ,  $X_{2-i} = (X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_c)$  designa a los restantes elementos del vector para  $i = r + 1, \dots, c$ .

Comenzar por  $\Lambda^0, X_2^0$  arbitrarios (factibles),  $j=0$

Hasta detectar convergencia

Desde  $i = 1, \dots, c$

Generar  $\lambda_i^{j+1} \sim p(\lambda_i|X^j, Y)$

Desde  $i = (r+1), \dots, c$

Generar  $X_{2-i}^{j+1} \sim p(X_{2-i}|X_{2-i}^j, \Lambda^{j+1}, Y)$

Actualizar  $X_2$

Hacer  $X_1 = A_1^{-1}(Y - A_2 X_2)$

$j = j + 1$

Algoritmo 2.1: Estrategia propuesta por Tebaldi y West (1998) para muestrear de  $(X_1, X_2)|Y$ .

Bajo las condiciones de nuestro problema, véase French y Ríos Insua (2000), se da la convergencia en distribución a  $X, \Lambda|Y$  que marginalizamos a la distribución de  $X|Y$ , (y a la de  $\Lambda|Y$ ). Veamos ahora las especificaciones de los pasos anteriores.

Tenemos, en primer lugar,

$$p(\Lambda|X, Y) = p(\Lambda|X) = \prod_{a=1}^c p(\lambda_a|X_a).$$

Si suponemos que los  $\lambda_a \sim Ga(\alpha_a, \beta_a)$  y son independientes, resulta que

$$\lambda_a|X_a \sim Ga(\alpha_a + X_a, \beta_a + 1).$$

Además, se tiene:

$$p(X_2|\Lambda, Y) \propto p(X_2, \Lambda, Y) \propto \prod_{a=1}^c \frac{\lambda_a^{X_a}}{X_a!},$$

en el soporte definido por  $X_a \geq 0$ ,  $a=1, \dots, c$ , puesto que tenemos el producto de distribuciones de Poisson independientes, restringidas por la condición (2.3). De aquí tenemos que, para  $i=(r+1), \dots, c$ ,

$$P(X_i|X_{2-i}, \Lambda, Y) \propto \frac{\lambda_i^{X_i}}{X_i!} \prod_{a=1}^r \frac{\lambda_a^{X_a}}{X_a!} = p_i(X_i),$$

sobre el soporte definido por  $X_i \geq 0$ ,  $X_a \geq 0$  para  $a= r+1, \dots, c$ .

Podemos entonces emplear un paso de Metropolis-Hastings (Chib & Greenberg, 1995), para muestrear de  $X_i$ . Así, si la distribución generadora de candidatos es  $q_i(\cdot)$ , por ejemplo, podemos decir que  $q_i \sim Po(\lambda_i)$ , dado el actual  $X_i$ , procedemos mediante el método de aceptación y rechazo dado en el algoritmo 2.2.

|   |
|---|
| <p>Generar <math>X_i^* \sim q_i(\cdot)</math></p> <p>Calcular <math>\alpha = \min \left( 1, \frac{p_i(X_i^*)q_i(X_i)}{p_i(X_i)q_i(X_i^*)} \right)</math></p> <p>Hacer <math>X_{i+1} = \begin{cases} X_i, &amp; \text{con probabilidad } 1-\alpha \\ X_i^*, &amp; \text{con probabilidad } \alpha \end{cases}</math></p> |
|---|

Algoritmo 2.2: Paso M-H para la generación de  $X_{i+1}$

A partir de la estructura de (2.4), podemos identificar cotas para las  $X_i$ , de forma que se proponga un rango apropiado para la distribución generadora de candidatos. Así, para un  $X_a$  dado  $X_{2-a}$ , tenemos que:

- $X_a \geq 0$ , es una cota inferior.
- $X_a \leq \min \{Y_i - \sum_{i \neq a} A_{i,j} X_j\}$ , donde  $i$  recorre los arcos que incluyen a  $X_a$ , i.e., tales que  $A_{i,a} = 1$ .

Entonces, dadas estas cotas iniciales, se comprueba si  $X_1 = A_1^{-1}(Y - A_2 X_2) \geq 0$ . Si no es así, el valor de prueba de  $X_a$  se incrementa, buscando la cota superior, o se reduce buscando la cota inferior, de su rango. El proceso concluye con las cotas resultantes, en cuanto  $X_1$  tiene  $r$  entradas no negativas.

Queda entonces el siguiente algoritmo MCMC.

$j = 0$

Inicializamos  $(X_1^0, X_2^0, \Lambda^0)$ .

Hasta convergencia

Desde  $i = \overbrace{1, \dots, r}^{X_1}, \overbrace{r+1, \dots, c}^{X_2}$

Generar  $\lambda_i^{j+1} \sim Ga(\alpha_i + X_i^j, \beta_i + 1)$

Desde  $i = r+1, \dots, c$

Generar  $X_i^* \sim Po(\lambda_i^{j+1})$

Si  $A_1^{-1}(Y - A_2 X_{2i}^{*j}) \geq 0$ ,  $X_i^{j+1} = X_i^j$

Si no,  $X_i^{j+1} = X_i^*$

$X_i^{j+1} = A_1^{-1}(Y - A_2 X_2^{j+1})$

$j = j + 1$

donde  $X_{2i}^{*j} = (X_{2r+1}^{j+1}, \dots, X_{2i-1}^{j+1}, X_i^*, X_{2i+1}^j, \dots, X_{2c}^j)$

#### 2.3.4. Modelo de Voton y Bedo

Voton y Bedo (2004) describen otro enfoque MCMC para calcular una solución del problema de la matriz O-D (2.2). El objetivo de nuevo es estimar  $X$  a través de la distribución a posteriori  $p(X | Y)$  respetando la restricción (2.3). Como distribución a priori, para  $X$  emplean una mixtura de distribuciones normales, con lo que cada flujo O-D viene aproximado por una mixtura de normales.

Suponemos aquí que nos interesa, de hecho, solamente un par de la matriz O-D. Las observaciones sucesivas  $X_1, X_2, \dots, X_n$  de los flujos del par, se distribuyen como una mezcla de normales, de manera que

$$p(X_i) = \sum_{j=1}^K w_j(k) G_{\mu_j, \sigma_j}(X_k)$$

$$i = 1, \dots, n$$

donde  $K$  es el número de términos de la mezcla, que, típicamente, tomará un valor entre 1 y 5;  $G_{\mu, \sigma}(\cdot)$  es la densidad de la distribución normal de media  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$ , y  $w_j(k)$  designa la probabilidad que  $X_i$  provenga de la componente  $j$ -ésima, cuando hay  $k$  componentes.

El problema entonces es estimar el número  $K$  de componentes, las medias  $\mu_j$ , las desviaciones estándar  $\sigma_j$  y las ponderaciones  $w_j(k)$ .

Para estimar el número de componentes  $K$  de la mezcla, se utiliza el algoritmo EM con un criterio de parada BIC. Para ello, para cada valor de  $K$  (desde  $K = 1$  hasta  $K = K_{max}$ ), se selecciona aquél valor que maximiza  $2 * L(K) - v(K)$ , donde  $L(K) = \log p(x; \hat{\theta}_K)$  es la log-verosimilitud para el modelo de mezcla con  $K$  componentes,  $\hat{\theta}_K$  es el estimador de máxima verosimilitud estimado mediante EM y  $v(K) = 3K - 1$  es el número de parámetros libres. (Kirby M. & Sirovich L., 1990).

### 2.3.5. Modelo de Zhang

Zhang (2006) adopta otro modelo para estimar  $X$  en el problema (2.2) basado en las mediciones  $Y$ . El problema real trabajado es más complejo:

$$Y_t = AX_t + \varepsilon_t,$$

donde  $\varepsilon_t$  es el error en el instante  $t$ .

Como antes, el objetivo es estimar  $X$  a través de la distribución de  $p(X|Y)$ . Para ello se plantea minimizar la pérdida esperada del estimador,  $\hat{X}(Y)$ , a través de la función de riesgo

$$\begin{aligned} R_{\hat{X}}(X) &= \int \|X - \hat{X}(Y)\|^2 dp(Y|X) \\ &= E_{Y|X} [\|X - \hat{X}(Y)\|^2] \end{aligned}$$

Usando probabilidades condicionales y la expansión de Karhunen-Loève (Kirby M. & Sirovich L., 1990), se obtiene

$$\begin{aligned} X &= \sum_i X_i v_i \\ \varepsilon &= \sum_i \varepsilon_i \mu_i \end{aligned} \tag{2.6}$$

donde  $\{X_i, i = 1, 2, \dots\}$  son variables aleatorias normales independientes con media  $\mu_i$  y varianza  $\gamma_i^2$ , y  $\{v_i, i = 1, 2, \dots\}$  son los elementos correspondientes de la base de la unidad de longitud. Se permiten que  $\{X_i, i = 1, 2, \dots\}$  estén centradas, i.e.  $\mu_i = 0$  y  $\{\varepsilon_i, i = 1, 2, \dots\}$  sean variables aleatorias normales independientes centradas con varianza  $\lambda_i^2$ . y  $\{\mu_i, i = 1, 2, \dots\}$  son idénticos a los elementos de la base en la expansión de Karhunen-Loève de  $X$  y  $\varepsilon$ , respectivamente. La distribución a posteriori de  $\mathbf{X} | \mathbf{Y} = Y$  puede representarse entonces mediante la misma expansión de Karhunen-Loève, únicamente que con coeficientes diferentes, con

$$(\mathbf{X} | \mathbf{Y} = Y) = \sum_i (X_i | Y_i = (\mu_i, Y)) v_i$$

donde  $\{X_i|Y_i = (\mu_i, Y), i = 1, 2, \dots\}$  son variables aleatorias normales independientes con media  $Y_i\sigma_i/(\sigma_i^2 + \lambda_i^2/\gamma_i^2)$  y varianza  $\gamma_i^2[1 - (\sigma_i^2 + \lambda_i^2/\gamma_i^2)]$  y  $(\cdot, \cdot)$  designa al producto vectorial.

De hecho, un estimador de  $\widehat{X}(Y)$  resulta ser

$$\widehat{X}(Y) = \sum_i \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda_i^2/\gamma_i^2} \frac{(u_i, Y)}{\sigma_i} v_i$$

donde  $(u_i, Y)$  es el producto vectorial entre  $u_i$  e  $Y$ , y  $u_i$  y  $v_i$  son variables aleatorias independientes.

### 2.3.6. Modelo de Lin, Cai, Huang

Lin et al (2003) usan el filtro de Kalman para resolver el problema de estimación de la matriz O-D y predecir el flujo en redes de tráfico. Resuelve una modificación dinámica de (2.2) dada por:

$$Y_t = A_t X_t + \varepsilon_t,$$

donde  $t$  designa un intervalo de tiempo y  $\varepsilon_t$  es el término de error, con distribución normal. Para resolver este problema, utilizan una técnica recursiva basada en técnicas de detección de puntos de cambio.

Para medir el error relativo, se utiliza la expresión  $\frac{\|X - \widehat{X}\|}{\|\widehat{X}\|}$  donde  $X$  y  $\widehat{X}$  son los flujos de la matriz O-D y el resultado estimado.

### 2.3.7. Modelo de Castillo, Menéndez y Santos

El modelo de Castillo et al (2008) se utiliza, entre varios propósitos, para ellos resolver el problema de estimar la matriz O-D, dados los conteos en algunos de los arcos, como en los modelos anteriores.

Castillo et al. (2008) introducen las siguientes hipótesis:

- El vector  $X$  de flujos de la matriz O-D sigue una distribución normal multivariante; es decir,  $X \sim N(\mu_x, \Sigma_x)$ .
- Dado  $X$ , la distribución del flujo  $Y_i$  en cada arco  $i$  sigue una distribución normal  $Y_i|X \sim N(\mu_i + \sum_{j \in \pi_i} \beta_{ij}(X_j - \mu_{xi}), \psi_i^2)$ , donde  $\beta_{ij}$  es el coeficiente de la regresión de  $Y_i$  dado  $X_j$ .

Como consecuencia, podemos escribir la distribución conjunta de  $X$  e  $Y$  mediante:

$$f(X_1, \dots, X_c, Y_1, \dots, Y_r) = f_{N(\mu_x, \Sigma_x)}(X_1, \dots, X_c) \prod_{i=1}^r f_{N(\mu_i + \sum_{j \in \pi_i} \beta_{ij}(X_j - \mu_{xi}), \psi_i^2)}(Y_j)$$

Para la estimación de este modelo emplean un algoritmo EM.

Otros modelos más sofisticados basados en esta misma estructura son los de Castillo, et al. (2011) y Sánchez- Cambronero et al. (2010).

### 2.3.8. Modelo de Cao, Yu, Davis y Vander

Cao et al. (2000) estudian el problema de la variación de flujos de tráfico. Esta metodología utiliza variables aleatorias normales y el método de máxima verosimilitud.

El coste computacional de este método es al menos de orden  $O(n^5)$ , que no es aceptable para una red de tamaño moderado, por lo que no podríamos resolver exactamente el problema. Deberíamos elegir subproblemas de menor tamaño para aplicarlo, de modo que

la precisión de la estimación seguiría siendo del mismo orden de magnitud que el problema completo, pero el coste computacional bajaría grandemente.

### 2.3.9. Resumen de los métodos de solución del problema de estimación de la matriz O-D

En el siguiente cuadro se expone un breve resumen de los métodos de estimación de la matriz O-D.

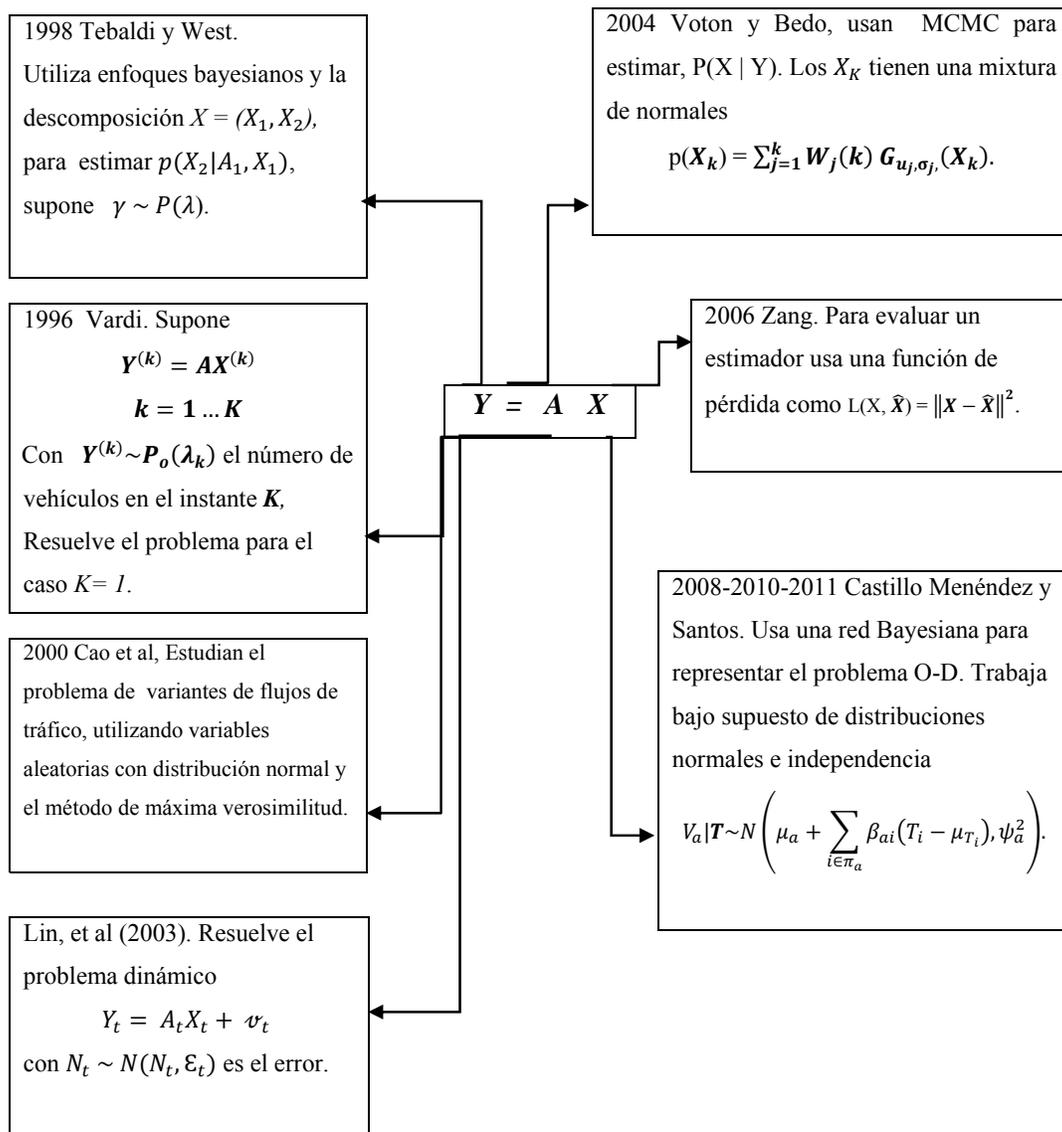


Figura 2.3. Resumen de los métodos propuestos en estado del arte para solución del problema de la matriz O-D.

## 2.4. Conclusiones

En este capítulo hemos revisado algunos de los conceptos principales de modelos de gestión de tráfico, con énfasis en el problema de estimación de la matriz O-D. Este último problema, que es central en nuestro desarrollo, es de interés no sólo en el problema de gestión de tráfico vehicular, sino también en problemas de gestión de telecomunicaciones, véase Cao et al (2000), Zhang (2006).

Este problema es desafiante y ha llamado la atención de numerosos investigadores. Podemos distinguir dos grandes grupos de modelo: los que utilizan técnicas estadísticas clásicas, como Vardi (1996), Cao et al (2000), Lin et al (2003); y los que emplean técnicas bayesianas, como Tebaldi (1998), Voton y Bedo (2004), Zhang (2006), Hazelton (2001). Entre otros aquellos que emplean redes bayesianas, como en Castillo et al (2008), aunque después emplean un método EMV.

Todos estos métodos requieren gran esfuerzo computacional para alcanzar una solución. Trabajan bajo condiciones particulares en cada caso específico, de manera que, plantear un procedimiento general resulta complicado. Por ejemplo, en el método de Tebaldi y West (1998), es necesario dar un punto de inicialización para ejecutar su modelo, lo cual complica su implementación.

Dados estos antecedentes, en el siguiente capítulo se presenta una nueva metodología basada en técnicas heurísticas, más precisamente basados en la aplicación de un algoritmo genético a la determinación de soluciones del problema (2.2)-(2.4).

## Capítulo 3

# Estimación del flujo de tráfico usando algoritmos genéticos

### 3.1 Introducción

Según los datos proporcionados por el INEC, es evidente el incremento vehicular y poblacional en la ciudad de Ambato que se ha producido en los últimos años, véase Tabla 1.1. Esto ha hecho que los diseños viales de la ciudad hayan ido quedando obsoletos, generando los problemas señalados en el Capítulo 1.

En este capítulo, se desarrolla un modelo matemático, para estimar los flujos vehiculares en una red de tráfico con ayuda de algoritmos genéticos, basado en (2.2) y (2.3). Más específicamente, el problema al que nos enfrentamos es partir de los datos de conteos de tráfico en algunos de los arcos, intentamos estimar los flujos vehiculares en las principales rutas O-D de una red. Después introduciendo diversos criterios adicionales ad. hoc, identificamos cuales de esas rutas presentan problemas de tráfico de diversa índole. Estas rutas serán candidatas a recibir intervenciones decididas, tal vez, con los métodos que presentaremos en el capítulo 4.

El método propuesto es general y se ilustra con dos segmentos de red de la ciudad de Ambato. El primer segmento en la calle Juan B. Vela, el segundo en la calle Espejo que tiene flujo de tráfico alto y dan servicio a los usuarios del Mercado Modelo.

## 3.2 Datos disponibles

Para la obtención de los datos de los flujos de tráfico, se parte del estudio de Acevedo (2011) que describe las tareas de recopilación de la información que emplearemos. En el mismo se definieron los días, horas y fechas de mayor volumen de tráfico en la zona del Mercado Modelo. En la Figura 3.1 (a) se identifican las intersecciones de las vías en las que se efectuaron las mediciones de volúmenes de tráfico. Los aforos vehiculares se realizaron a lo largo de un período en la mañana (8:00 a 8:45), al medio día (12:00 a 12:45) y en la tarde (16:00 a 16:45), medidos cada cuarto de hora, el 10 de febrero del 2011.

Además, se agregaron todos los accesos de las intersecciones y los volúmenes de tránsito según tres tipos de vehículo: livianos (a), autobuses (b) y camiones (c). A los datos obtenidos se les aplica la fórmula de vehículo equivalente sugerida por Acevedo (2011)

$$\text{Vehículo equivalente} = a + 2b + 2.5c \quad (3.1)$$

La Figura 3.1 (b) muestra el grafo, que representa la red del flujo de tráfico asociado a la Figura 3.1 (a), que empleamos en nuestra visualización del problema.

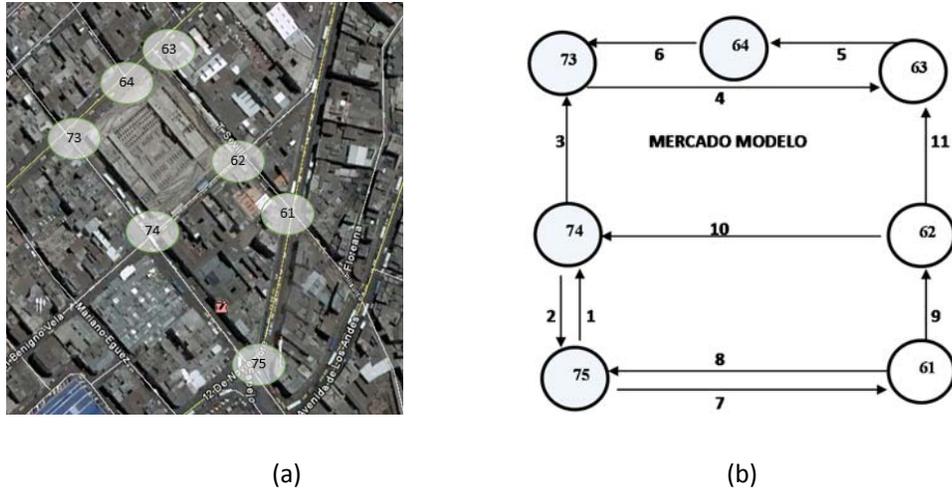


Figura 3.1. Red de transporte de la zona del Mercado Modelo en la ciudad de Ambato. (a) Mapa real, (b) grafo que representa la red de flujo de tráfico de vehículos.

Para el estudio, cada nodo ha sido etiquetado con un número y se han identificado las calles que entran y salen de los mismos. La Tabla 3.1 refleja la denominación de los arcos y su distancia. Finalmente, en la cuarta columna se indica el volumen de vehículos equivalentes registrados en las diferentes direcciones de los arcos, de la medición realizada en el periodo de la mañana de 8:00 a 8:15 horas.

| Orden | Arco    | Distancia (m) | Vehículos ¼ h |
|-------|---------|---------------|---------------|
| 1     | 75 – 74 | 119,23        | 199           |
| 2     | 74 – 75 | 119,23        | 53            |
| 3     | 74 - 73 | 101,40        | 156           |
| 4     | 73 –63  | 85,00         | 182           |
| 5     | 63– 64  | 24,00         | 130           |
| 6     | 64 - 73 | 61,00         | 121           |
| 7     | 75 – 61 | 114,46        | 197           |
| 8     | 61 - 75 | 114,46        | 209           |
| 8     | 61 – 62 | 58,52         | 56            |
| 10    | 62– 74  | 89,00         | 268           |
| 11    | 62– 63  | 102,93        | 35            |

Tabla 3.1. Volúmenes de tráfico y distancias en los once arcos de la zona del Mercado Modelo.

Los flujos  $Y$  que transforman los conteos en vehículos equivalentes en los once arcos en los distintos horarios se detallan en la Tabla 3.5.

La red tiene 11 arcos y 7 nodos. Por ello, en principio, habría 42 (= 7×6) pares O-D. Sin embargo, no todos los pares O-D son realizables. Por ejemplo, no es posible la ruta del origen 73 al destino 75, puesto que las calles tienen sentido contrario. De hecho, sólo resultan 28 pares O-D válidos, que se describen en la Tabla 3.2, junto con la ruta más habitual entre el origen y el destino correspondientes. Así, por ejemplo, el par O-D # 22 es el 62-61, siendo la ruta más habitual 62-74, 74-75, 75-61.

| <b>Xa</b>       | <b>a(i,j)</b>                         | <b>Xa</b>       | <b>a(i,j)</b>         |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| X <sub>1</sub>  | 75 – 74                               | X <sub>15</sub> | 63 – 64, 64-73        |
| X <sub>2</sub>  | 75-74,74 – 73                         | X <sub>16</sub> | 63 – 64               |
| X <sub>3</sub>  | 75-61, 61-62, 62 – 63, 63-64          | X <sub>17</sub> | 62- 74, 74-75         |
| X <sub>4</sub>  | 75 – 74, 74-73,73-63                  | X <sub>18</sub> | 62 – 74               |
| X <sub>5</sub>  | 75 – 61, 61-62                        | X <sub>19</sub> | 62-74, 74-73          |
| X <sub>6</sub>  | 75 – 61                               | X <sub>20</sub> | 62-63, 63-64          |
| X <sub>7</sub>  | 74 – 75                               | X <sub>21</sub> | 62 – 63               |
| X <sub>8</sub>  | 74 – 73                               | X <sub>22</sub> | 62 – 74, 74-75, 75-61 |
| X <sub>9</sub>  | 74-75, 75-61, 61- 62, 62- 63, 63 - 64 | X <sub>23</sub> | 61 – 75               |
| X <sub>10</sub> | 74-73, 73-63                          | X <sub>24</sub> | 61-75, 75-74          |
| X <sub>11</sub> | 74-75, 75-61,61-62                    | X <sub>25</sub> | 61-75,75-74,74-73     |
| X <sub>12</sub> | 74-75, 75-61                          | X <sub>26</sub> | 61-62, 62-63, 63-64   |
| X <sub>13</sub> | 73 – 63                               | X <sub>27</sub> | 61-62, 62-63          |
| X <sub>14</sub> | 64 – 73                               | X <sub>28</sub> | 61-62                 |

Tabla 3.2. Pares O-D factibles de rutas en la red del Mercado Modelo.

En la Figura 3.2 se muestran en forma gráfica todas las rutas factibles O-D generadas en esta red de tráfico.

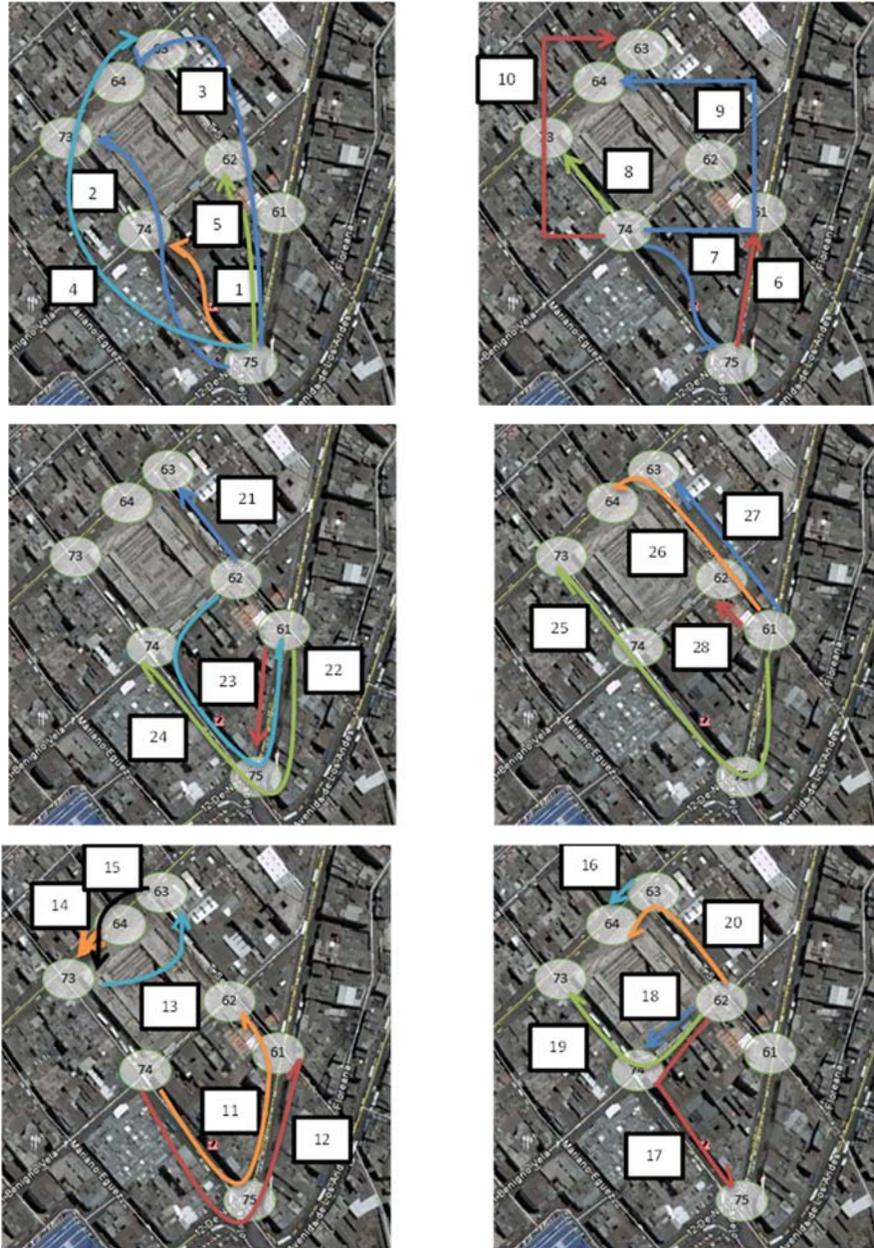


Figura 3.2. Representación gráfica de las 28 rutas del área del Mercado Modelo.

La correspondiente matriz de incidencias A para las rutas O-D y enlaces identificados en esta red se muestra en la Tabla 3.3

|     | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | X13 | X14 | X15 | X16 | X17 | X18 | X19 | X20 | X21 | X22 | X23 | X24 | X25 | X26 | X27 | X28 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| y1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| y2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| y3  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| y4  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| y5  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   |
| y6  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| y7  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| y8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| y9  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   |
| y10 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| y11 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   |

Tabla 3.3. Matriz de incidencia para las rutas del Mercado Modelo.

### 3.3 Elementos de un Algoritmo Genético para la estimación de flujos de tráfico en una red

Los algoritmos genéticos (AG) buscan aproximar sucesivamente la mejor solución de entre un conjunto de soluciones factibles en un problema de optimización. Para ello, emulan la evolución biológica a través de la selección natural, utilizando operaciones entre soluciones que se denominan de selección, de mutación y de cruce (Haupt & Haupt, 2004). Son parte de una familia de algoritmos denominada meta-heurísticas, que han demostrado un mejor comportamiento que los métodos tradicionales de optimización en algunos problemas de gran complejidad en su solución.

Como luego se verá, en el problema de estimación la matriz O-D se resolverá mediante un problema del tipo

$$\min_{x \in T} F(x), \tag{3.2}$$

i.e. se busca una solución  $x$  que minimice la función de coste, bajo ciertas restricciones descritas por el conjunto  $T$  sobre el conjunto de soluciones. Para ello, se utiliza el esquema de la Figura 3.3 (Haupt & Haupt, 2004).

Para el funcionamiento del AG es necesario generar una población inicial ó conjunto de soluciones factibles, tomando en consideración las características del problema bajo estudio. De hecho, un parámetro muy importante en relación con la eficacia y la eficiencia del AG será el número de individuos en tal población. Este valor se mantendrá constante durante toda la ejecución y es necesario asignarlo a través de una experimentación preliminar, observando el comportamiento del algoritmo y verificando el tiempo de ejecución de la búsqueda.

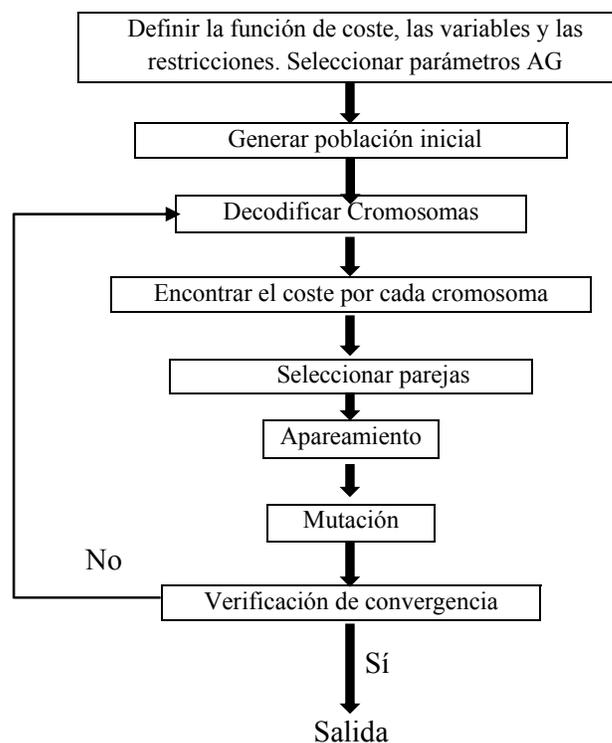


Figura 3.3. Diagrama de la estructura de funcionamiento de un AG.

Describimos a continuación los elementos de nuestro problema y la variante del algoritmo genético adoptado.

## A. Función de coste y restricciones

En general, el propósito de cualquier AG es la búsqueda de una solución que optimice cierta función objetivo. El primer paso para resolver un problema con AG será identificar esta función que dependerá de las variables de decisión para las que deseamos encontrar los valores óptimos. La función de coste  $F(x)$  que empleamos para resolver el problema de estimación del problema de la matriz O-D es

$$F(x) = \|y - A_1x_1 - A_2x_2\|_2^2 \quad (3.3)$$

sujeto a las restricciones de no negatividad

$$\begin{aligned} x_1 &\geq 0 \\ x_2 &\geq 0, \end{aligned} \quad (3.4)$$

En (3.3),  $\|\cdot\|_2$  designa a la norma eudéica, y adoptamos la norma al cuadrado para simplificar computacionalmente el problema. Recordemos que nuestro objetivo inicial, véase sección 2.3, era encontrar una o más soluciones factibles del sistema  $Y = AX$ , que, en general, es no determinado. Observemos que podemos escribir  $Y - AX = 0$ , lo que llevaría a resolver el problema  $\min \|Y - AX\|_2^2$  cuyo objetivo global es 0, si hubiese una solución factible. Si ahora recordamos la descomposición  $A = (A_1, A_2)$  allí descrita, entonces proponemos resolver el problema  $\min \|Y - A_1X_1 - A_2X_2\|_2^2$ , exigiendo que la solución  $X$  sea no negativa. Obsérvese que el problema se puede plantear como uno de mínimos cuadrados, en el que intentaremos minimizar el cuadrado del error cuadrático.

## B. Representación de los genes

Una vez determinado la función objetivo, procedemos a adoptar una representación adecuada de las soluciones. En nuestro modelo, un gen o individuo estará representado por un vector de enteros no negativos de dimensión  $c$ , que, recordemos, es el número de columnas de la matriz A de incidencia de rutas, que coincide con el número de rutas O-D. En la figura 3.4, se presenta un ejemplo de gen, para el problema de la red de tráfico del Mercado Modelo que, como hemos dicho, tiene  $c=28$  elementos.

|    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |   |    |    |
|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|---|---|---|----|----|
| 37 | 12 | 6 | 35 | 29 | 54 | 10 | 58 | 45 | 55 | 57 | 47 | 18 | 38 | 40 | 26 | 52 | 56 | 7 | 18 | 18 | 41 | 19 | 4 | 8 | 9 | 42 | 40 |
|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|---|---|---|----|----|

Figura 3.4. Representación de una iteración como gen de nuestro problema.

$X_i$  es el resultado de la comparación entre poblaciones de flujos vehiculares en un arco, de tal manera, que buscamos la que aproxime mejor para  $Y_i = \sum_{j=1}^c a_{ij}X_j \quad i = 1, \dots, r$ .

## C. Población inicial y cromosomas

La población inicial está compuesta por un conjunto de genes, similares al que se generan en la Figura 3.5. El tamaño de la población, en la mayoría de casos, se elige experimentalmente de acuerdo al problema. En este caso, se ha elegido utilizar un tamaño de 1000.

|                        |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |   |    |    |
|------------------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|---|---|---|----|----|
| Tamaño de la población | 37 | 12 | 6 | 35 | 29 | 54 | 10 | 58 | 45 | 55 | 57 | 47 | 18 | 38 | 40 | 26 | 52 | 56 | 7 | 18 | 18 | 41 | 19 | 4 | 8 | 9 | 42 | 40 |
|                        | 4  | 8  | 3 | 4  | 5  | 6  | 4  | 3  | 2  | 1  | 2  | 2  | 3  | 1  | 4  | 5  | 3  | 4  | 1 | 0  | 1  | 4  | 2  | 1 | 0 | 1 | 0  | 1  |

Figura 3.5. Población inicial del AG.

## **D. Selección**

La fase de selección introduce una función de adaptación que permita implementar selectividad en la evolución de la población: los padres con mejor adaptación deben tener más hijos; prácticamente, los padres con peores resultados deben tener menos hijos. Existen varias estrategias para la selección, por ejemplo, por escalonamiento, por torneo, o por ruleta. (Haupt & Haupt, 2004). En nuestro método, cada individuo de la población tendrá una probabilidad de selección proporcional a su solución en la función objetivo, de manera que los individuos con mejor, i.e. menor, valor en la función objetivo recibirán mayor probabilidad de ser seleccionados como padres y, por ende, tenderán a generar más hijos en la siguiente generación. Estos constituyen, de hecho, el denominado método de la ruleta.

## **E. Apareamiento**

El apareamiento es la creación de uno o más hijos a partir de padres seleccionados. En problemas reales en los que se aplican algoritmos genéticos, existe la tendencia a la homogenización de la población, es decir a que todos los individuos sean cada vez más parecidos. Esto impide que el algoritmo siga explorando nuevas soluciones, con lo que podemos quedar estancados en un óptimo local.

En nuestro ejemplo, se eligen dos padres y la descendencia será una combinación de éstos. El método más sencillo consiste en elegir aleatoriamente uno o más puntos en el cromosoma y marcarlos como puntos de cruce. Entonces, las variables se intercambian entre ambos padres. Como ejemplo, supongamos que los padres son como se indica en la Figura 3.6.

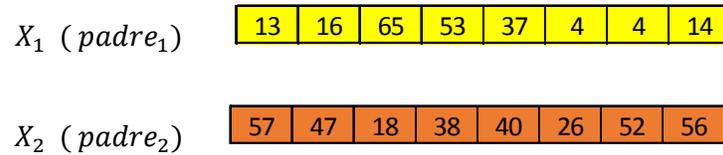


Figura 3.6. Representación de los padres.

A continuación se seleccionan al azar los puntos de cruce. Después, se intercambian las secciones intermedias para obtener la descendencia:

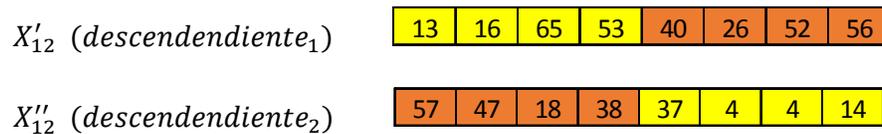


Figura 3.7. Representación de la primera descendencia a partir del padre 1 y del padre 2.

## F. Mutación

En ocasiones, el AG puede converger demasiado rápido una región del conjunto factible. Si en esta zona se encuentra el óptimo global, se alcanzaría una solución óptima. Sin embargo, algunas funciones objetivo, como la aquí modelizada, tienen múltiples mínimos locales. Si no hacemos nada para resolver esta tendencia a converger rápidamente, podríamos terminar en un mínimo local en lugar de uno global, tal vez con importantes pérdidas en los resultados.

Para evitar este problema de convergencia excesivamente rápida, se puede forzar al algoritmo a explorar otras áreas de la región factible mediante la introducción de cambios al azar, denominados mutaciones en la jerga de los AG, en algunas de las variables.

Por ejemplo, en la Figura 3.8 se ha seleccionado al azar la posición 5 y este valor ha cambiado de 37 a 30. Este último valor, se ha generado aleatoriamente, respetando las condiciones del problema.

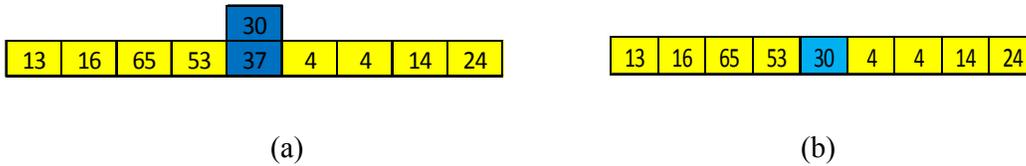


Figura 3.8. Representación de la mutación dentro de una solución, a) indica que la posición 5 ha sido elegida, (b) muta el valor de la posición 5.

## G. Número de generaciones

El número de generaciones es el número de iteraciones completas del algoritmo a partir de la población inicial, siempre que no se den otras condiciones de convergencia. Este número se fija experimentalmente.

Las condiciones típicas de convergencia se refieren a una reducción pequeña en la función objetiva o una variación pequeña en la población al final de cada intervención.

### 3.4 Estimación del flujo de tráfico en la red del Mercado Modelo usando AG

Como ilustración de los conceptos, consideramos la red de flujo de tráfico de la zona seleccionada descrita en la Figura 3.1. Como hemos indicado en el capítulo 1, es una zona especialmente conflictiva con altos niveles de congestión debido a los numerosos comercios, empresas de transporte, etc.

Los parámetros empleados en el AG se presentan en la Tabla 3.4.

| Parámetro          | Valor |
|--------------------|-------|
| Prob. Selección    | 0.3   |
| Prob. Mutación     | 0.3   |
| Prob. Apareamiento | 0.5   |
| Num. Generaciones  | 5000  |
| Tam. Población     | 1000  |

Tabla 3.4. Parámetros del AG utilizados en el problema de flujo de tráfico de la red del Mercado Modelo.

Los datos de tráfico empleados para el análisis vienen reflejados en la Tabla 3.5. Incluyen los volúmenes de vehículos en los 11 enlaces, contabilizado el traslado desde un nodo inicial a uno final, en un espacio de tiempo determinado, en las horas de mayor congestión, en la mañana, a medio día y por la tarde.

| ENLACES  |              | FLUJO DE DATOS EN HORAS PUNTA |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|--------------|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Y_i$    | $S_{(i, j)}$ | 8:00                          | 8:15 | 8:30 | 8:45 | 12:00 | 12:15 | 12:30 | 12:45 | 16:00 | 16:15 | 16:30 | 16:45 |
| $Y_1$    | 75 - 74      | 199                           | 187  | 184  | 190  | 192   | 190   | 196   | 200   | 187   | 194   | 188   | 193   |
| $Y_2$    | 74 - 75      | 53                            | 48   | 70   | 53   | 58    | 62    | 57    | 53    | 68    | 52    | 60    | 50    |
| $Y_3$    | 74 - 73      | 156                           | 144  | 142  | 131  | 132   | 138   | 132   | 172   | 134   | 119   | 169   | 150   |
| $Y_4$    | 73 - 63      | 182                           | 158  | 186  | 140  | 192   | 194   | 162   | 195   | 182   | 206   | 212   | 220   |
| $Y_5$    | 63 - 64      | 130                           | 160  | 168  | 134  | 276   | 204   | 193   | 181   | 246   | 171   | 169   | 183   |
| $Y_6$    | 64 - 73      | 121                           | 146  | 149  | 121  | 250   | 183   | 169   | 159   | 220   | 147   | 149   | 159   |
| $Y_7$    | 75 - 61      | 196                           | 193  | 182  | 199  | 212   | 200   | 216   | 208   | 185   | 215   | 184   | 191   |
| $Y_8$    | 61 - 75      | 209                           | 197  | 208  | 214  | 203   | 200   | 198   | 199   | 200   | 218   | 197   | 201   |
| $Y_9$    | 61 - 62      | 57                            | 49   | 80   | 57   | 56    | 62    | 222   | 208   | 74    | 53    | 212   | 230   |
| $Y_{10}$ | 62 - 74      | 268                           | 213  | 222  | 265  | 290   | 248   | 243   | 240   | 280   | 313   | 220   | 228   |
| $Y_{11}$ | 62 - 63      | 34                            | 39   | 66   | 44   | 80    | 52    | 61    | 41    | 51    | 57    | 66    | 95    |

Tabla 3.5. Datos de vehículos en los enlaces para la red del Mercado Modelo con 7 nodos.

El AG implementado en MATLAB se ha ejecutado en un ordenador con procesador Intel (R) Core (TM) i7-3612QM CPU @ 2.10 GHz, con 8 Gb de RAM. Los tiempos de cálculo para los distintos horarios en la red de tráfico del Mercado Modelo se presentan en la Tabla 3.6, siendo el valor óptimo teórico 0, existiendo óptimos alternativos.

| Valor óptimo | Instante del tiempo | # de generaciones | Tiempo de procesamiento |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| 2.45         | 8:00                | 300               | 1h40min                 |
| 1.73         | 8:15                | 280               | 1h45min                 |
| 2.65         | 8:30                | 300               | 1h50min                 |
| 2.65         | 8:45                | 280               | 1h58min                 |
| 2.65         | 12:00               | 300               | 1h45min                 |
| 2.45         | 12:15               | 460               | 1h50min                 |
| 2.23         | 12:30               | 260               | 1h30min                 |
| 2.23         | 12:45               | 260               | 1h35min                 |
| 3.32         | 16:00               | 160               | 1h30min                 |
| 3.87         | 16:15               | 420               | 2h30min                 |
| 2.44         | 16:30               | 300               | 1h45min                 |
| 2.23         | 16:45               | 240               | 1h58min                 |

Tabla 3.6. Tiempo de cálculo del AG en la red del Mercado Modelo.

Los valores óptimos de  $X$ , para los distintos horarios, se detallan en la Tabla 3.7. En la Fig. 3.9 se observa una imagen de la evolución de la función de coste a lo largo de las generaciones, en el proceso de optimización, en el horario de las 8:00, llegando a un valor del error relativo del 2,45 %, muy cercano a 0.

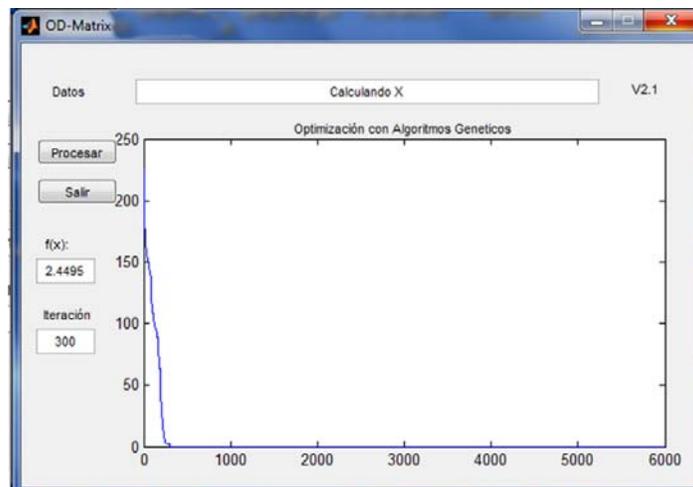


Figura 3.9. Evolución de la función de coste a lo largo de las generaciones del AG en la red.

Adicionalmente se puede apreciar que a partir de la generación 200, prácticamente no se han producido mejoras en la función objetivo, con lo que podríamos detener el algoritmo

en esa iteración. Observemos que podríamos haber utilizado las iteraciones disponibles a partir de la 200 en calcular otras soluciones a partir de otras soluciones iniciales, en lo que podría verse como una versión multicomienzo de un algoritmo genético. Este hecho resulta especialmente relevante en un problema como el nuestro en el que, como se observa en la tabla 3.7, se detectan óptimos alternativos asociados a distintas soluciones aproximadas del sistema de interés.

### 3.5 Interpretación de los resultados

El procedimiento anterior nos permite estimar los flujos en las rutas O-D. En el capítulo 4 introduciremos un criterio probabilístico para evaluar la auticidad de tales rutas. Aquí, para la interpretación de los mismos, introduciremos algunos criterios deterministas que permitirán comprender mejor el estado del tráfico, adaptándoles a la planificación de tráfico. Estas serán:

- i. **Longitud de la ruta:** Se definen dos tipos de rutas, cortas y largas. En este ejemplo, diremos que una ruta es corta cuando une dos nodos. Diremos que una ruta es larga cuando une tres o más nodos. En general, diremos que una ruta es corta cuando, típicamente, no requiere el uso de vehículo para su recorrido.
- ii. **Importancia de la ruta:** Se definen dos tipos de rutas, importante y no importante. Diremos que una ruta es importante si tiene transporte público en todo su recorrido (en al menos más la mitad de su trayectoria). En caso contrario, será no importante. En una ciudad es deseable disponer de un buen sistema de transporte público que reemplace al transporte privado. Con el criterio de importancia introducido, estamos suponiendo que el ayuntamiento ha realizado un estudio previo e introducido transporte público a las rutas principales.

- iii. **Relevancia de la ruta:** Se definen dos tipos de rutas, relevante e irrelevante. Se dice que una ruta es relevante si es importante y tiene tráfico alto. En este ejemplo, entendemos que hay tráfico alto si transitan más de 50 vehículos, en el periodo de 15 minutos, por carril. En caso contrario decimos que es irrelevante. La importancia del tráfico, se define en función en la experiencia de este autor en la Dirección de Tránsito y Movilidad en la ciudad de Ambato.

|     | RUTAS | FLUJOS O-D CALCULADOS CON AG |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |       | 8:00                         | 8:15 | 8:30 | 8:45 | 12:00 | 12:15 | 12:30 | 12:45 | 16:00 | 16:15 | 16:30 | 16:45 |
| X1  | 75-74 | 50                           | 55   | 88   | 90   | 47    | 78    | 87    | 66    | 67    | 119   | 63    | 82    |
| X2  | 75-73 | 1                            | 35   | 7    | 17   | 2     | 16    | 3     | 1     | 1     | 1     | 2     | 3     |
| X3  | 75-64 | 1                            | 13   | 41   | 18   | 6     | 16    | 15    | 11    | 6     | 23    | 33    | 15    |
| X4  | 75-63 | 48                           | 19   | 45   | 11   | 68    | 23    | 20    | 77    | 60    | 9     | 73    | 20    |
| X5  | 75-62 | 14                           | 32   | 22   | 35   | 46    | 15    | 79    | 57    | 49    | 4     | 43    | 78    |
| X6  | 75-61 | 127                          | 100  | 48   | 93   | 102   | 107   | 65    | 87    | 62    | 135   | 48    | 48    |
| X7  | 74-75 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X8  | 74-73 | 61                           | 111  | 59   | 83   | 133   | 71    | 95    | 61    | 120   | 63    | 35    | 95    |
| X9  | 74-64 | 60                           | 35   | 90   | 38   | 117   | 112   | 74    | 98    | 100   | 84    | 114   | 64    |
| X10 | 74-63 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X11 | 74-62 | 109                          | 78   | 64   | 112  | 73    | 120   | 99    | 104   | 141   | 153   | 97    | 98    |
| X12 | 74-61 | 105                          | 88   | 87   | 101  | 160   | 67    | 88    | 84    | 71    | 107   | 64    | 81    |
| X13 | 73-63 | 9                            | 8    | 18   | 17   | 38    | 11    | 26    | 8     | 10    | 18    | 7     | 26    |
| X14 | 64-73 | 21                           | 15   | 3    | 6    | 33    | 7     | 17    | 19    | 17    | 12    | 8     | 40    |
| X15 | 63-73 | 51                           | 45   | 68   | 50   | 55    | 59    | 54    | 50    | 65    | 50    | 57    | 47    |
| X16 | 63-64 | 1                            | 41   | 1    | 30   | 55    | 7     | 13    | 39    | 1     | 1     | 50    | 15    |
| X17 | 62-75 | 99                           | 77   | 43   | 71   | 74    | 72    | 81    | 48    | 58    | 64    | 28    | 80    |
| X18 | 62-74 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 5     | 8     | 1     | 1     | 22    | 8     |
| X19 | 62-73 | 1                            | 1    | 2    | 1    | 1     | 16    | 1     | 1     | 16    | 2     | 10    | 12    |
| X20 | 62-64 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 7     | 1     |
| X21 | 62-63 | 38                           | 1    | 12   | 1    | 1     | 12    | 124   | 136   | 1     | 21    | 117   | 122   |
| X22 | 62-61 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X23 | 61-75 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X24 | 61-74 | 1                            | 1    | 2    | 1    | 1     | 31    | 15    | 1     | 1     | 1     | 8     | 37    |
| X25 | 61-73 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X26 | 61-64 | 1                            | 1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| X27 | 61-63 | 133                          | 138  | 139  | 128  | 123   | 140   | 127   | 117   | 121   | 196   | 131   | 163   |
| X28 | 61-62 | 58                           | 102  | 16   | 59   | 113   | 48    | 76    | 62    | 113   | 43    | 4     | 65    |

Tabla 3.7. Estimación de flujos O-D mediante el AG en los distintos horarios.

A continuación, utilizando las definiciones anteriores, realizamos las siguientes consideraciones respecto a las rutas O-D, basados en los flujos O-D estimadas mediante

el AG y reflejados en la tabla 3.7. Para las rutas que se identifican como mejorables se menciona algunos de los problemas a resolver.

- No se considera las rutas  $X_7$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{13}$ ,  $X_{14}$ ,  $X_{15}$ ,  $X_{16}$ ,  $X_{19}$ ,  $X_{20}$ ,  $X_{21}$ ,  $X_{22}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{24}$ ,  $X_{25}$ ,  $X_{26}$  porque no parecen relevante. (el flujo de tráfico es menor que 50 vehículos por 15 minutos y carril, y/o no hay transporte público, además son rutas cortas).
- $X_1$ : Ruta corta, con alto tráfico. Tiene transporte público. Incluye entradas a garajes privados. No se respetan las señales de tránsito.
- $X_2$ : Ruta larga, con bajo tráfico. Tiene transporte público. Por tanto, puede recibir mayor capacidad de otras rutas, ayudando a equilibrar el tráfico en esta zona.
- $X_3$ : Ruta larga, con bajo tráfico. Tiene transporte público, es irrelevante y se podría usar para equilibrar el tráfico.
- $X_4$ : Ruta larga, con alto tráfico en la mayor parte de los periodos. Tiene transporte público, relevante e importante. El exceso de volumen de tráfico de esta ruta debería repartirse a otra o ampliarse, de alguna forma, su capacidad.
- $X_5$ : Ruta larga, con alto tráfico. Tiene transporte público. Dispone de paradas de autobuses, el ingreso al centro artesanal y comercios. Una posible solución sería desviar tráfico hacia otras rutas.
- $X_6$ : Ruta corta, con tráfico alto. Existen varias líneas de autobuses en esta ruta, siendo por esto relevante. De nuevo, una posible solución sería desviar parte del tráfico hacia otras rutas.
- $X_8$ : Ruta corta, con tráfico alto. Tiene transporte público. Es relevante, existen paradas de autobuses de transporte público e ingreso al garaje público municipal. Para aliviar la congestión, su tráfico debería reubicarse en otras rutas, tal vez relocalizando alguno de los servicios.

- $X_9$ : Ruta larga, con alto tráfico. Tiene transporte público. Existen paradas de autobuses de transporte público e ingreso a garajes privados. Para aliviar la congestión, podría reubicarse a otras rutas.
- $X_{11}$ : Ruta larga, con alto tráfico. Tiene transporte público. Dispone de un ingreso al mercado artesanal. Su tráfico se debería reubicar a otras rutas.
- $X_{12}$ : Ruta larga, con alto tráfico. Tiene transporte público. Dispone de un ingreso a garaje privado. La solución sería controlar el transporte privado.
- $X_{17}$ : Ruta corta, con alto tráfico. Tiene transporte público. Existen paradas para dos líneas de autobuses. Existen puertas de entrada y salida al Mercado Modelo. La solución principal sería desviar el tráfico hacia otras rutas.
- $X_{18}$ : Ruta larga, con bajo tráfico. Tiene transporte público. Dispone de parada de autobuses, comercio de primera necesidad.
- $X_{27}$ : Ruta larga, con alto tráfico. No tiene transporte público. Tiene un parking tarifado. Una solución sería gestionar mejor el transporte público y eliminar el mencionado parking.
- $X_{28}$ : Ruta corta, con tráfico alto. No tiene transporte público, tiene área de carga y descarga de productos. No se suelen respetar las señales de tránsito. La solución es reubicar el tráfico a otra ruta y tal vez alguno de los servicios.

En la Figura 3.10 y en el anexo 1 literal D, se presentan las gráficas de evolución del flujo de tráfico en las tres franjas horarias para la red del Mercado Modelo. Por ejemplo, en el horario de 8:00 a 8:45, se puede observar cómo la ruta  $X_1$  se va congestionando con el transcurso del tiempo. Esto tiene sentido debido a que en esta franja horaria se van incrementando las actividades comerciales. Además, en esta ruta se encuentran dos líneas de buses, un garaje particular, el Mercado Artesanal y otros comercios menores. En general, el tráfico es algo menor en los tramos de medio día y de tarde.

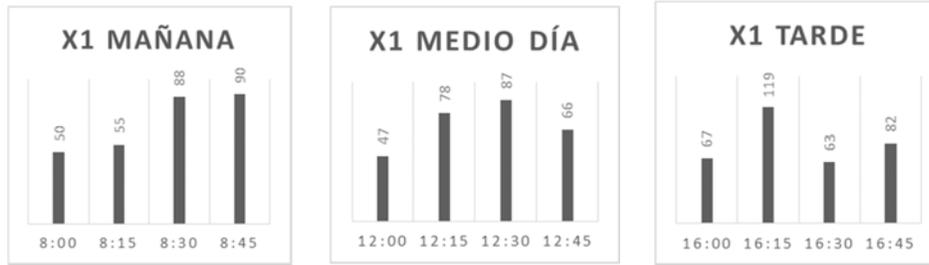


Figura 3.10. Evolución del flujo de tráfico de la ruta  $X_1$  en los tres horarios.

### 3.6 Aplicación a la red de tráfico del casco central urbano de Ambato

Consideremos ahora la aplicación de nuestro método de estimación en un ejemplo algo mayor. Además del interés aplicado de la zona, como describiremos a continuación, el ejemplo nos permite explicar cuestiones computacionales al enfrentarnos a problemas de dimensión mayor.

Corresponde pues al casco central urbano de Ambato, delimitada por la calle Bolívar al norte, la avenida 12 de Noviembre al sur, la calle Tomás Sevilla al oeste y la calle Ayllón al este. Es una zona muy congestionada por vehículos que realizan recorridos a los diferentes centros educativos, instituciones públicas y privadas allí localizadas. La Figura 3.11 muestra el mapa del área de trabajo. La Figura 3.12 muestra su grafo asociado. La Tabla 3.8 muestra la estructura de las rutas que forman los flujos vehiculares, indicándose los enlaces que forman tales rutas. Obsérvese que, a partir de los 21 nodos de la red, inicialmente habría  $420 = 21 \times 20$  pares O-D. Sin embargo, un análisis de rutas direccionalmente factibles muestra, por ejemplo, que la ruta O-D 50-51 no es factible. De hecho, hay 400 rutas O-D son factibles. A partir de ello, seleccionamos las rutas y construimos la Tabla 3.8, quedan 39 rutas O-D sobre las que trabajamos.

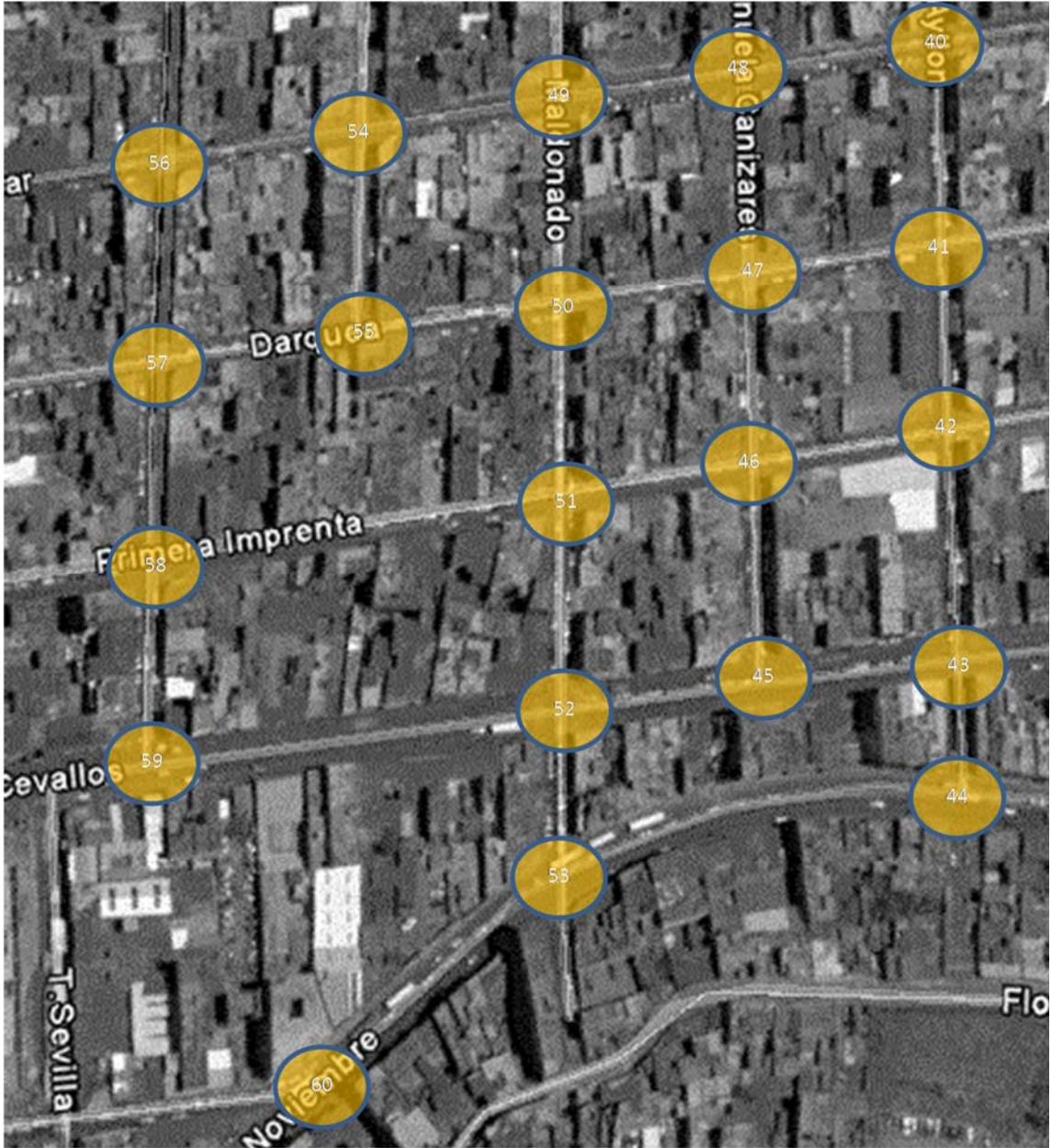


Figura 3.11. Mapa de la zona de estudio, Casco Central Urbano de la ciudad de Ambato. Imagen tomada de Google Maps

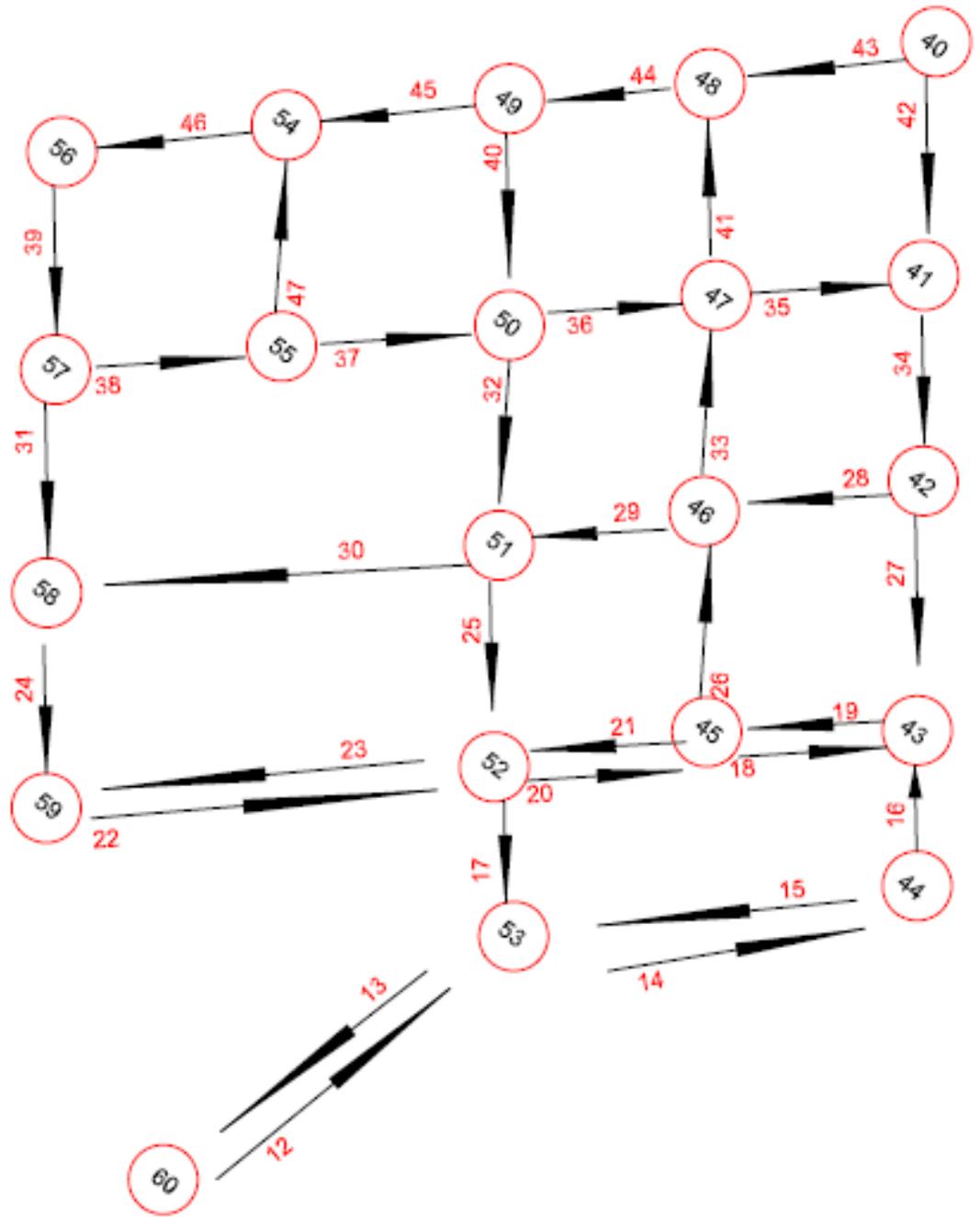


Figura 3.12. Distribución de los nodos y enlaces del Casco Central Urbano de la ciudad de Ambato.

| RUTA | O-D   | RECORRIDO DE RUTA          | RUTA | O-D   | RECORRIDO DE RUTA                          |
|------|-------|----------------------------|------|-------|--|
| x1   | 40-41 | 42                         | x223 | 51-54 | 25, 20, 26, 33, 41, 44, 45                 |
| x7   | 40-47 | 42, 34, 28, 33             | x243 | 52-55 | 20, 26, 33, 41, 44, 45, 46, 39, 38         |
| x8   | 40-48 | 43                         | x244 | 52-56 | 20, 26, 33, 41, 44, 45, 46                 |
| x30  | 41-51 | 34,28,29                   | x249 | 53-41 | 14, 16, 19, 26, 33, 35                     |
| x31  | 41-52 | 34, 27, 19, 21             | x254 | 53-46 | 14, 16, 19, 26                             |
| x48  | 42-50 | 28, 33, 41, 44, 40         | x256 | 53-48 | 14, 16, 19, 26, 33, 41                     |
| x68  | 43-51 | 19, 26, 29                 | x263 | 53-56 | 14, 16, 19, 26, 33, 41, 44, 45, 46         |
| x71  | 43-54 | 19, 26, 33, 41, 44, 45     | x269 | 54-42 | 46, 39, 38, 37, 36, 35, 34                 |
| x88  | 44-52 | 16, 19, 21                 | x270 | 54-43 | 46, 39, 31, 24, 22, 20, 18                 |
| x102 | 45-47 | 26, 33                     | x274 | 54-47 | 46, 39, 38, 37, 36                         |
| x103 | 45-48 | 26, 33, 41                 | x289 | 55-43 | 37, 32, 25, 20, 18                         |
| x120 | 46-45 | 29, 25, 20                 | x302 | 55-57 | 47, 46, 39                                 |
| x130 | 46-56 | 33, 41, 44, 45, 46         | x316 | 56-51 | 39, 38, 37, 32                             |
| x137 | 47-43 | 36, 34, 27                 | x358 | 58-55 | 24, 22, 20, 26, 33, 41, 44, 45, 46, 39, 38 |
| x147 | 47-54 | 41, 44, 45                 | x359 | 58-56 | 24, 22, 20, 26, 33, 41, 44, 45, 46         |
| x203 | 50-53 | 32, 25, 17                 | x360 | 58-57 | 24, 22, 20, 26, 33, 41, 44, 45, 46, 39     |
| x207 | 50-57 | 36, 41, 44, 45, 46, 39     | x384 | 60-43 | 12, 14, 16                                 |
| x209 | 50-59 | 32, 25, 23                 | x385 | 60-44 | 12, 14                                     |
| x220 | 51-50 | 25, 20, 26, 33, 41, 44, 40 | x393 | 60-52 | 12, 14, 16, 19, 21                         |
|      |       |                            | x400 | 60-59 | 12, 14, 16, 19, 21, 23                     |

Tabla 3.8. Rutas O-D principales del casco central urbano de Ambato. En la tercera y sexta columnas se identifican en color rojo los enlaces que tienen transporte público. En color negro, las que no tienen tal servicio.

### 3.6.1 Flujos O-D en casco central urbano de la ciudad de Ambato

Para encontrar la solución óptima, en el caso de la red de transporte del casco central urbano de Ambato, aplicamos el AG con los siguientes parámetros:

a.- El número de filas de la matriz O-D es 36, correspondientes a los arcos en los que se mide el tráfico, como se muestra en la Tabla 3.5 anexo 2 literal A.

b.- El número de columnas de la matriz O-D es 400, correspondientes a las rutas O-D factibles. Una vez culminado los tiempos computacionales, se realiza un análisis de resultados sobre los flujos en toda la red y seleccionamos la de mayor congestión, quedando 39.

Los parámetros empleados en el AG se presentan en la Tabla 3.9.

| Parámetro          | Valor |
|--------------------|-------|
| Prob. Selección    | 0.3   |
| Prob. Mutación     | 0.3   |
| Prob. Apareamiento | 0.5   |
| Num. Generaciones  | 5000  |
| Tam. Población     | 1000  |

Tabla 3.9. Parámetros del AG utilizados en el problema del casco urbano de Ambato.

El tiempo de cómputo total empleado en este ejemplo es de 55 días, para los 12 periodos.

En la Tabla 3.10, se describen con detalle los resultados del proceso de optimización. Se aprecia pues el alto coste computacional que conlleva el método, si no se aplica con cuidado.

| Valor óptimo | Instante del tiempo | # de generaciones | Tiempo de procesamiento |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| 139.04       | 8:00                | 4120              | 4d18h13min              |
| 148.14       | 8:15                | 3440              | 4d10h04min              |
| 138.11       | 8:30                | 3920              | 4d10h12min              |
| 149.59       | 8:45                | 3680              | 5d01h43min              |
| 124.01       | 12:00               | 3140              | 3d10h04min              |
| 119.67       | 12:15               | 3400              | 4d18h15min              |
| 129.36       | 12:30               | 3280              | 4d10h53min              |
| 119.30       | 12:45               | 3040              | 4d03h04min              |
| 126.46       | 16:00               | 3940              | 4d08h57min              |
| 157.58       | 16:15               | 3140              | 3d22h53min              |
| 136.78       | 16:30               | 3280              | 6d10h16min              |
| 118.59       | 16:45               | 4000              | 5d07h08min              |
| tiempo total |                     |                   | 55d20h48min             |

Tabla 3.10. Iteraciones y tiempos empleados en el Software del AG.

Los resultados de  $X_{opt}$  se describen y presentan en forma gráfica en las siguientes secciones. Se ha escogido esta estrategia de comunicación por cuanto es más informativa para el público en general y para los planificadores de tráfico, en particular.

### 3.6.2 Interpretación de las soluciones de la red de tráfico del casco central urbano

Como en el caso inicial, se introducen diversos criterios determinísticos para clasificar las rutas O-D principales.

- **Longitud de ruta:** Diremos que una ruta es corta cuando se puede realizar caminando en condiciones normales. Se dice que una ruta es larga cuando debemos tomar un medio de transporte, para realizarla con cierta comodidad. Para esta aplicación, consideraremos que el umbral está en tres manzanas.
- **Saturación del flujo de tráfico:** Cuando la velocidad en marcha de un vehículo se encuentra por debajo de 5 km/h se vuelve intolerable para el conductor. Por ello, se ha

decidido adoptar la ecuación de capacidad en HCM (2000) y la información de Acevedo (2011), para obtener la capacidad de  $C=367$  vehículos/hora, por carril.

Equivalentemente, se obtiene para 15 min, un flujo máximo de 92 vehículos por carril. A partir de (2.1) se conoce que al sobrepasar el 70% de la capacidad se producen problemas de saturación, lo que conduce a un umbral de 64 vehículos por carril. Es decir, si  $X_i$ , es mayor que 64 vehículos por carril, entonces consideraremos que la ruta está saturada. En caso contrario, la ruta estará no saturada.

Utilizando estos conceptos de longitud de viaje y de saturación, se ha construido la Tabla 3.11, identificándose además si las rutas tienen transporte público o no sobre las 39 rutas de la Tabla 3.8.

Además, en ella se describe el identificador de la ruta, y su origen y destino dentro de la misma. Se detallan también las actividades que existen en cada uno de los sectores, junto con otras características relevantes. El cuadro ayuda a identificar los problemas que existen en los principales recorridos y, a su vez, permiten generar posibles soluciones de planificación, algunas de las cuales se explorarán en el capítulo 4.

Por otra parte, las Figuras 3.13 y 3.14 muestran los recorridos de las rutas más utilizadas, tanto por usuarios de transporte público como privado. Para facilitar su comprensión, se utiliza un código de cuatro colores para cuatro posibles variables representadas en la función de los resultados de flujos de tráfico. Así pues, principalmente tendremos que actuar en las zonas marcadas de color naranja y rojo para mitigar la saturación, descartando las zonas marcadas de azul y verde.

| RUTA | O-D   | TIEMPO | TRÁFICO     | HAY AUTOBUSES | OTROS  | SOLUCIONES   |
|------|-------|--------|-------------|---------------|--|--|
| X1   | 40-41 |        | saturado    |               | Viveres.   |  |
| X7   | 40-47 | V      | saturado    |               | Viveres, comercios artesanales.  | Soporta tráfico de otras rutas.                      |
| X8   | 40-48 |        | saturado    | X             | Viveres, comercios artesanales.  |  |
| X30  | 41-51 |        | no saturado |               | Viveres, comercios artesanales, línea blanca.  |  |
| X31  | 41-52 | V      | saturado    | X             | Viveres, comercios artesanales, Instituciones educativas.  |  |
| X48  | 42-50 | V      | saturado    | X             | Viveres, comercios artesanales, Instituciones públicas   | Desviar el tráfico por otra ruta                     |
| X68  | 43-51 |        | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales.  |  |
| X71  | 43-54 | V      | no saturado | X             | Viveres, ferreterías, instituciones Educativas y Públicas.   |  |
| X88  | 44-52 |        | no saturado | X             | Viveres, Ferreterías, Instituciones bancarias.   |  |
| X102 | 45-47 |        | no saturado | X             | Viveres, Restaurantes, Instituciones Públicas.   |  |
| X103 | 45-48 |        | no saturado | X             | Viveres Restaurantes, Instituciones Públicas.  |  |
| X120 | 46-45 |        | saturado    | X             | Viveres, Parking tarifados, Mercado Ferroviario.   | Quitar los Parking tarifados, desviar por otra ruta. |
| X130 | 46-56 | V      | saturado    | X             | Viveres, Comercios artesanales, Instituciones Públicas y bancarias.  | Desviar el tráfico liviano por otra ruta.            |
| X137 | 47-43 | V      | no saturado |               | Viveres, comercios artesanales.  | Soporta tráfico de otras rutas.                      |
| X147 | 47-54 | V      | no saturado | X             | Viveres, Ferreterías, Instituciones Educativas y Públicas.   |  |
| X203 | 50-53 |        | no saturado |               | Viveres, comercios artesanales.  | Soporta tráfico de otras rutas.                      |
| X207 | 50-57 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercio artesanal, Instituciones Educativas.   |  |
| X209 | 50-59 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercio artesanales, Ferreterías, frigoríficos, panaderías.  | Soporta tráfico de otras rutas.                      |
| X220 | 51-50 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales, Ferreterías.   |  |
| X223 | 51-54 | V      | no saturado | X             | Viveres.   |  |
| X243 | 52-55 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales, Ferreterías, Instituciones Educativas y Públicas.                                |  |
| X244 | 52-56 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales, Ferreterías, Instituciones Educativas y Públicas.                                |  |
| X249 | 53-41 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales, Casa Musical,  |  |
| X254 | 53-46 | V      | no saturado | X             | Viveres, Ferretería, comercios artesanales.  |  |
| X256 | 53-48 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercio artesanal, ferreterías, Instituciones educativas y públicas, mercado de ropa.                  |  |
| X263 | 53-56 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercios artesanales, Ferreterías, Instituciones Educativas y Públicas, Mercado Ferroviario            |  |
| X269 | 54-42 | V      | saturado    |               | Parking tarifados, viveres, comercios artesanales, alimentación avícola.   |  |
| X270 | 54-43 | V      | no saturado | X             | Parking tarifados, viveres, comercios artesanales, alimentación avícola.   |  |
| X274 | 54-47 | V      | saturado    |               | Parking tarifados, viveres, comercios artesanales, alimentación avícola.   |  |
| X289 | 55-43 | V      | saturado    | X             | Parking tarifados, viveres, comercios artesanales, alimentación avícola.   | Quitar los Parking tarifados, desviar por otra ruta. |
| X302 | 55-57 | V      | no saturado |               | Viveres, comercios artesanales.  |  |
| X316 | 56-51 | V      | no saturado |               | Viveres, comercios artesanales, equipos de pequeña industria.  |  |
| X358 | 58-55 | V      | saturado    | X             | Viveres, comercios artesanales, Ferreterías, Instituciones Educativas, Públicas, Mercado Ferroviario             |  |
| X359 | 58-56 | V      | no saturado | X             | Viveres, comercio artesanal, ferreterías, Instituciones educativas, públicas, Mercado la ferroviaria.            |  |
| X360 | 58-57 | V      | saturado    | X             | Viveres, comercio artesanal, ferreterías, Instituciones educativas, públicas, el comercio informal ocupa la vía. |  |
| X384 | 60-43 |        | no saturado | X             | Viveres, restaurantes, Mercado la Ferroviaria, parada de autobuses.  |  |
| X385 | 60-44 |        | no saturado | X             | Viveres, restaurantes, Mercado la Ferroviaria, parada de autobuses.  |  |
| X393 | 60-52 | V      | saturado    | X             | Viveres, Restaurantes, Instituciones bancarias,  | Desviar el tráfico por otras rutas.                  |
| X400 | 60-59 | V      | no saturado | X             | Viveres, restaurantes, Mercado Ferroviaria, parada de autobuses.   |  |

Tabla 3.11. Uso de rutas más congestionadas de la red del casco urbano

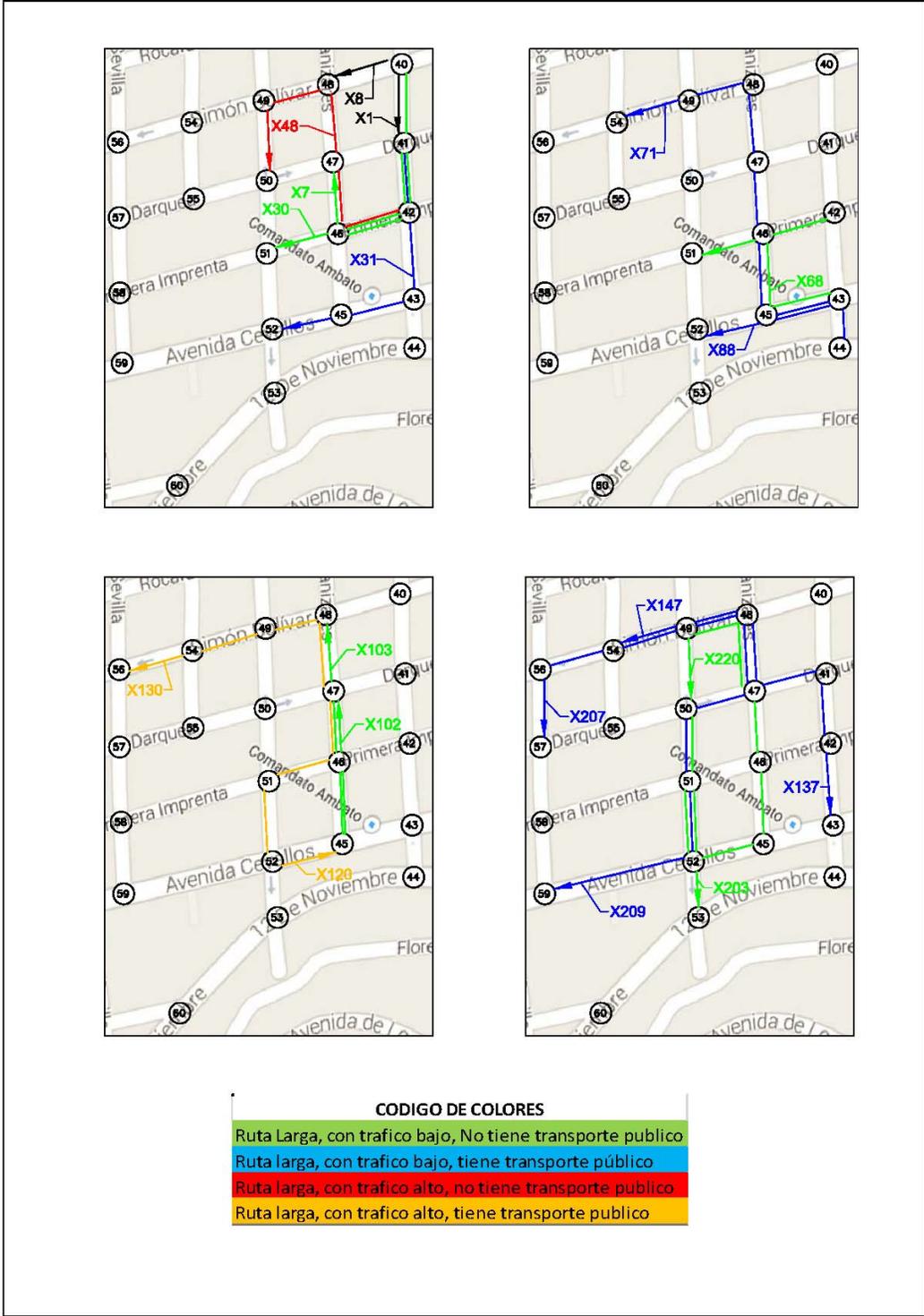


Figura 3.13. Flujo de tráfico de rutas en el casco central de Ambato.



Figura 3.14. Flujo de tráfico de rutas en el casco central de Ambato.

### 3.7 Conclusiones

En este capítulo, hemos aportado un nuevo método de estimación de flujos en rutas O-D a partir de conteos en enlaces con ayuda de un algoritmo genético. El método se ha probado sobre dos redes de transporte, que pertenecen al casco urbano de la ciudad de Ambato, una de las zonas más congestionadas por la presencia de comercios y varias instituciones, públicas y privadas.

El AG es una técnica heurística en la que se prueban varias soluciones a la vez, requiriendo un importante esfuerzo computacional. Para su aplicación, transformamos el problema original de estimación en un problema de optimización, asimilable a un problema de mínimos cuadrados. Buscando después sucesivamente la mejor solución de entre un conjunto de soluciones factibles, emulando la evolución biológica, utilizando operaciones de selección, mutación y cruce, a través de varias generaciones. Los resultados reflejan soluciones de buena calidad, debido a que en todos los casos alcanzan valores cercanos a 0.

Una vez estimado los flujos O-D se introducen criterios determinísticos de saturación, longitud o presencia de transporte público, entre otros, para identificar rutas O-D que requieran intervenciones de mejora. La representación gráfica de tales rutas permite identificar aquellas en las que resulta necesario actuar para mejorar el tráfico, así como las rutas en las que se pueden aprovechar para dar soluciones a las zonas identificadas como problemáticas.

En el capítulo 4 presentaremos un esquema de simulación mediante el que se explorarán varios escenarios con políticas para mejorar el tráfico de Ambato permitiendo aumentar la capacidad del tráfico.



## Capítulo 4

# Un modelo de simulación para la mejora y expansión de la capacidad de tráfico

### 4.1. Introducción

En el capítulo anterior, hemos introducido un método para estimar flujos O-D en una red de tráfico y lo hemos aplicado a una red de la ciudad de Ambato. A partir de estos flujos, se pueden determinar las rutas en las que, potencialmente, se produce una alta saturación de tráfico y parecería necesario actuar, por ejemplo, alterando el sentido del tráfico, ampliando el número de carriles o reduciendo las plazas de un eventual parking. En este capítulo, proponemos un modelo de simulación que permite identificar las mejores acciones a tomar para mitigar la congestión vial.

Para ello, se utilizará un modelo estocástico de flujo de tránsito, intentando buscar una distribución adecuada a partir de una muestra obtenida de flujos. Con la aproximación presentada, se construye un modelo sobre los flujos O-D en la red y se predice el impacto que las intervenciones pueden tener sobre el tráfico en la misma. Finalmente, empleando diversas medidas de comportamiento, escogeremos la mejor cartera de contramedidas resolviendo el correspondiente problema de optimización.

La red sobre la que se probará el modelo es la mostrada en la sección 3.6, que incluía 39 pares O-D. De ellos, habían sido identificados como conflictivos los que se muestran en la Tabla 4.1, en la que se identifica el nombre de cada una de las rutas, ya sean por su destino final o por el nombre de su calle principal.

Recordemos que su identificación como conflictiva se había hecho con criterios deterministas basados en el flujo de tráfico, la longitud de la ruta y la presencia de transporte público.

| CASO | RUTA             | O-D   | NOMBRE                       |
|------|------------------|-------|------------------------------|
| 1    | X <sub>31</sub>  | 41-52 | AVENIDA CEVALLOS             |
| 2    | X <sub>48</sub>  | 42-50 | MANUELA CAÑIZARES            |
| 3    | X <sub>120</sub> | 46-45 | CENTROS COMERCIALES          |
| 4    | X <sub>130</sub> | 46-56 | MUNICIPIO                    |
| 5    | X <sub>269</sub> | 54-42 | ALIMENTACIÓN AVÍCOLA         |
| 6    | X <sub>274</sub> | 54-47 | EQUIPOS DE PEQUEÑA INDUSTRIA |
| 7    | X <sub>289</sub> | 55-43 | COMERCIO DE VÍVERES          |
| 8    | X <sub>393</sub> | 60-52 | INSTITUCIONES BANCARIAS      |

Tabla 4.1. Rutas con mayor saturación durante las tres franjas horarias.

## 4.2. Soluciones

En esta sección se plantean las posibles soluciones a emplear para mejorar el tráfico en la zona de estudio. La lista no es exhaustiva, pero sí representativa y típica de las contramedidas que se vienen propiciando y aplicando en diversas ciudades globalmente.

- 1 *Aumento del número de carriles.* La motivación de esta medida es intentar despejar la calle en horas punta. Por ejemplo, se puede prohibir el aparcamiento en la calzada. Una desventaja de esta solución es que los usuarios deben buscar lugares alternativos de aparcamiento.
- 2 *Cambio de sentido en calles.* Como en el caso anterior, permite aumentar la capacidad de movilización en un sentido determinado. La desventaja es que se puede producir inconformidad entre los usuarios, especialmente al inicio del cambio.
- 3 *Relocalización de servicios.* Al reducir la demanda por el servicio relocalizado, se reduce el flujo y se recupera espacio para tránsito. Sin embargo, algunos usuarios de los servicios deberán trasladarse a lugares muchas veces más lejanos.

- 4 *Restricción de la circulación.* Esta estrategia se utiliza ampliamente en varias ciudades latinoamericanas como Quito, Santiago o Medellín, donde se prohíbe o restringe la circulación en ciertos horarios o días. Para esto, se puede tomar como referencia el número de matrícula. La ventaja de esta iniciativa es que se reduce el número de vehículos en las calles, mejorando sustancialmente el flujo vehicular. La principal desventaja es que, con el paso del tiempo, algunos usuarios tienden a adquirir otro vehículo, llegando a saturarse el tráfico.
- 5 *Aumento del número de autobuses de transporte público.* Esta estrategia suele acompañar a la anterior debido a que, al restringir el transporte privado, se deben aumentar las alternativas de movilización. Así, se pueden incluir nuevas rutas de autobuses en hora punta, o bien incrementar la intensidad de las mismas. Como desventaja, se presenta la incomodidad de los usuarios al tener que emplear el transporte público.
- 6 *Eliminación o cambio de puntos de semáforos.* Puede acelerar el tráfico en una calle. Sin embargo, puede aumentar la probabilidad de accidentes si no se realizan los cambios con suficiente cuidado. En efecto, al existir semáforos en las intersecciones de las calles de la ciudad, se ordena el flujo vehicular. Por contra, se emplea mayor tiempo para realizar el recorrido vehicular en las rutas. Por lo tanto, al reducir los tiempos de luz roja se consigue que haya menos tiempos muertos, incrementando así los tiempos verdes, si se mantiene el tiempo del ámbar. Requiere, sin embargo, un esfuerzo adicional de coordinación.
- 7 *Desvío de la circulación por otra ruta.* Puede descongestionar las calles saturadas, Sin embargo, puede aumentar el tiempo de recorrido del transporte público, porque, típicamente, hay que adoptar rutas más largas.

8 *Redistribución de horarios.* Se intenta evitar que la hora de movilización del sector laboral coincida con la de los estudiantes. La propuesta podría mejorar el tráfico al redistribuir la demanda de transporte en diferentes horarios.

A las soluciones presentadas, se las denotará como medidas  $S_j$ , para  $j = 1, \dots, 8$ .

En la Tabla 4.2 se describe la aplicabilidad de estas soluciones en nuestro caso de estudio, explicándose en detalle el significado de tales actuaciones sobre cada una de las rutas conflictivas.

| RUTA      | O-D   | SOLUCIONES |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------|-------|------------|----|----|----|----|----|----|----|
|           |       | S1         | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
| $X_{31}$  | 41-52 |            |    |    | X  |    |    | X  |    |
| $X_{48}$  | 42-50 |            | X  |    | X  |    | X  |    |    |
| $X_{120}$ | 46-45 | X          |    |    | X  |    |    |    |    |
| $X_{130}$ | 46-56 |            |    | X  | X  |    | X  | X  | X  |
| $X_{269}$ | 54-42 |            |    |    | X  | X  |    |    |    |
| $X_{274}$ | 54-47 |            |    |    | X  |    |    |    | X  |
| $X_{289}$ | 55-43 | X          |    |    | X  | X  |    |    |    |
| $X_{393}$ | 60-52 |            |    |    | X  |    |    |    | X  |

Tabla 4.2. Posibles soluciones para mejorar el tráfico en las rutas congestionadas.

1.  $S_1$  es aplicable a  $X_{120}$  y  $X_{289}$ , porque hay aparcamientos que se pueden eliminar. Así, se consigue aumentar el número de carriles.
2.  $S_2$  es aplicable a  $X_{48}$ , porque se puede cambiar el sentido de la calle Maldonado de norte-sur a sur-norte, y ésta forma parte principal de la ruta.
3.  $S_3$  es aplicable a  $X_{130}$ . De hecho, se explora que el Ayuntamiento se traslade al sector de Huachi Chico.
4.  $S_4$  basada en el número de matrícula es aplicable en todas las rutas, puesto que es una medida global que se puede implementar en toda la red.

5.  $S_5$  es aplicable a  $X_{269}$  y  $X_{289}$ , pues estas rutas no disponen de líneas de autobuses de transporte público. Por tanto, se podrían utilizar para descongestionar el tráfico privado.
6.  $S_6$  es aplicable a  $X_{48}$  y  $X_{130}$ , porque existen semáforos en cada intersección que ralentizan el flujo vehicular. Si se implementase un plan de semaforización adecuado en las intersecciones, se podría dar mayor fluidez al tráfico.
7.  $S_7$  es aplicable a  $X_{31}$  y  $X_{130}$ . Son rutas con alto tráfico público y privado que, por la cercanía con la calle Maldonado, podrían dirigirse hacia ésta, reduciendo distancia y tiempos de viaje.
8.  $S_8$  es aplicable a  $X_{130}$ ,  $X_{274}$  y  $X_{393}$ , puesto que en estas rutas existen instituciones bancarias, educativas y comercios importantes, en las que los usuarios y empleados comparten horarios de entrada y salida parecidos. Como alternativa, por ejemplo, los empleados de banca podrían entrar a las 9:00 AM, los Colegios ingresar a las 7:00 AM y los comercios a las 8:00 AM.

#### 4.3. Modelo estocástico de flujo de tráfico

Introducimos aquí un modelo estocástico de flujo de tráfico basado en los resultados del Capítulo 3. Allí se presentó un método para estimar los flujos O-D  $X$  a partir de las observaciones  $Y$  sobre alguna de las vías que conforman la red. Para ello, se tendrá en cuenta el sistema de ecuaciones

$$Y = AX$$

sujeto a

$$X \geq 0,$$

donde  $A$  es la matriz de incidencias de la red. Después buscamos una solución mediante un algoritmo genético.

Tal procedimiento se aplica sobre doce intervalos de tiempo, en la mañana, día medio y tarde, dando lugar a los sistemas

$$Y^k = AX^k, \quad k = 1, \dots, 12$$

$$X^k \geq 0$$

siendo las correspondientes soluciones  $X^k, k = 1, \dots, 12$ .

Estudiando estas soluciones, se comprueba que ocho de las variables, recogidas en la Tabla 4.2, parecían críticas, en el sentido de que se relacionaban con flujos O-D que sugerían problemas de saturación relevantes. En lo que sigue, se seleccionarán tales variables  $X_{31}, X_{48}, X_{120}, X_{130}, X_{269}, X_{274}, X_{289}, X_{393}$  y se redesignarán mediante  $X = (X_1, X_2, \dots, X_8)$ . Así,  $\{X^k = (X_1^k, X_2^k, \dots, X_8^k)\}_{k=1}^{12}$  será una representación de los flujos por las rutas en los doce periodos de tiempo considerados.

Se puede, de hecho, suponer que esta representación constituye una muestra de la distribución de los flujos O-D en los tramos críticos de la ciudad en las hora de mayor tráfico, por ejemplo, suponiendo que hemos generado aleatoriamente la solución inicial del AG en cada caso.

Se ajusta ahora un modelo a esta muestra. Antes, observemos que, como indicamos en el capítulo 3, en la solución aproximada de los sistemas mediante AG hemos realizado un enorme esfuerzo computacional. Alternativamente, podríamos haber realizado menos iteraciones; o menos iteraciones desde otras soluciones iniciales; o menos iteraciones con métodos más económicos desde varias soluciones iniciales, para conseguir tamaños

muestrales mayores de la distribución de flujos O-D. Sin embargo, como veremos, en nuestro caso resulta suficiente utilizar la muestra propuesta. Previo al estudio en detalle del modelo, observemos que para algunas de las  $X_i$   $i = 1, \dots, 8$ , podríamos adoptar un modelo de mixturas normales, cuando el régimen de tráfico cambie en los tres horarios escogidos de forma significativa.

La Figura 4.1 muestra los histogramas y diagramas de dispersión para las ocho variables o flujos potencialmente críticos. Se puede apreciar cómo varias de ellas están ligeramente interrelacionadas. Además, se aprecia que las densidades de la diagonal tienen forma de campana de Gauss en bastantes casos, sugiriendo normalidad marginal de las distribuciones  $X_i$ . Los diagramas de dispersión fuera de la diagonal sugieren también normalidad bivalente de los pares  $(X_i, X_j), i \neq j, i, j = 1, \dots, 8$

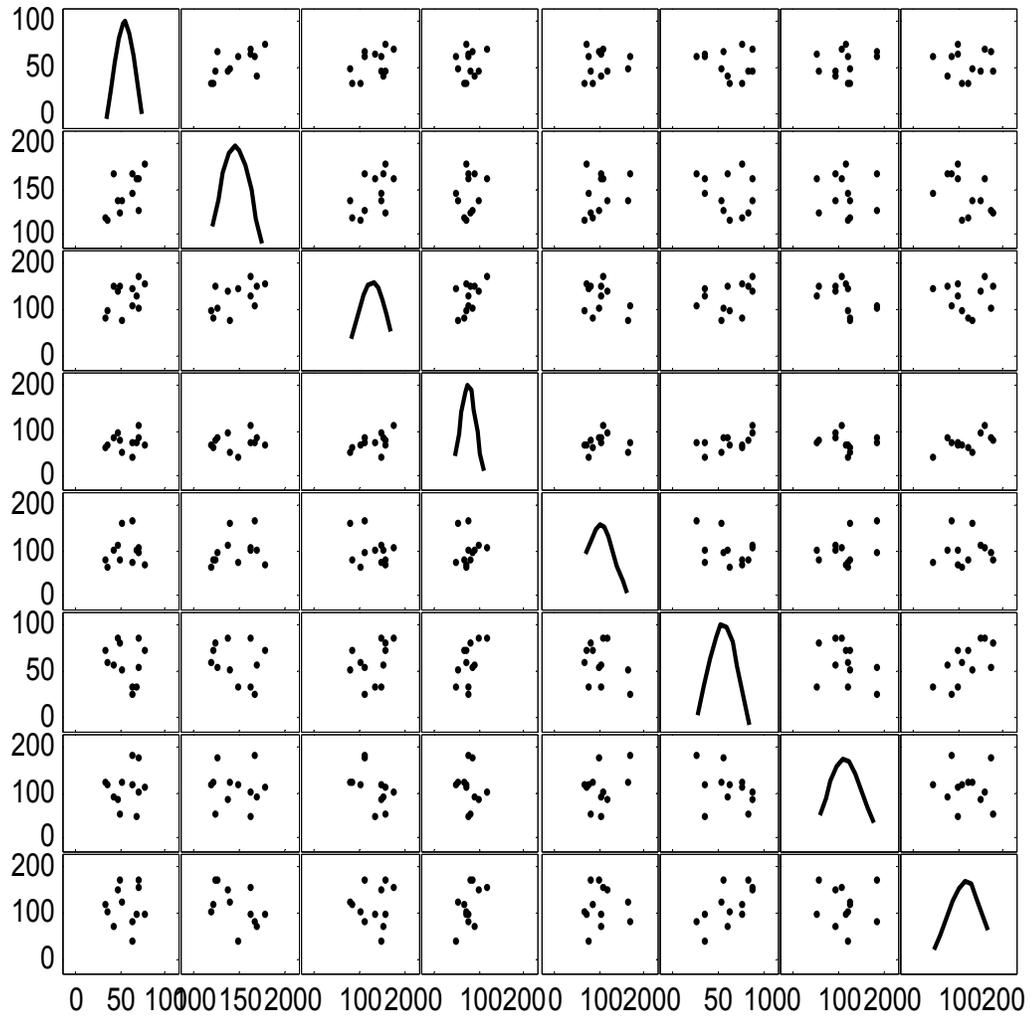


Figura 4.1. Diagramas de dispersión de los flujos X.

La matriz de correlación de la Tabla 4.3 muestra el grado de asociación entre las distintas variables. Para facilitar su comprensión, se genera un esquema de colores para los valores de la correlación. Así, si el valor de la correlación está entre 0,5 y 0,7, tendrá un color azul. Para correlaciones negativas entre -0,5 y -0,7, se asigna color verde. Esta codificación permite reconocer rápidamente la posible asociación entre las distintas  $X$ 's, que no es especialmente fuerte.

|            | <b>O-D</b>  | 41-52    | 42-50    | 46-45     | 46-56     | 54-42     | 54-47     | 55-43     | 60-52     |
|------------|-------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>O-D</b> | <b>RUTA</b> | $X_{31}$ | $X_{48}$ | $X_{120}$ | $X_{130}$ | $X_{269}$ | $X_{274}$ | $X_{289}$ | $X_{393}$ |
| 41-52      | $X_{31}$    | 1        | 0,61     | 0,44      | 0,13      | 0,09      | -0,23     | 0,17      | 0,01      |
| 42-50      | $X_{48}$    | 0,61     | 1        | 0,52      | 0,16      | 0,24      | -0,28     | -0,05     | -0,47     |
| 46-45      | $X_{120}$   | 0,44     | 0,52     | 1         | 0,53      | -0,35     | 0,32      | -0,50     | 0,00      |
| 46-56      | $X_{130}$   | 0,13     | 0,16     | 0,53      | 1         | 0,03      | 0,56      | -0,21     | 0,57      |
| 54-42      | $X_{269}$   | 0,09     | 0,24     | -0,35     | 0,03      | 1         | -0,35     | 0,35      | 0,05      |
| 54-47      | $X_{274}$   | -0,23    | -0,28    | 0,32      | 0,56      | -0,35     | 1         | -0,37     | 0,66      |
| 55-43      | $X_{289}$   | 0,17     | -0,05    | -0,50     | -0,21     | 0,35      | -0,37     | 1         | -0,08     |
| 60-52      | $X_{393}$   | 0,01     | -0,47    | 0,00      | 0,57      | 0,05      | 0,66      | -0,08     | 1         |

Tabla 4.3. Correlación de los flujos que presentan mayores problemas de congestión.

Obsérvese que ciertas rutas con valores de correlación positiva comparten enlaces con una sola dirección. Por ejemplo, las rutas  $X_{31}$  y  $X_{48}$  comparten los nodos 43-45 de la avenida Cevallos. Igualmente, sucede con las rutas  $X_{48}$  y  $X_{130}$ , que comparten el flujo de tráfico en la calle Bolívar en los nodos 48-49. La ruta  $X_{274}$  es continuación de la  $X_{130}$  y tiene un valor de correlación positiva alto.

Para avanzar en la construcción de escenarios de gestión de tráfico, adoptamos un modelo normal para  $X = (X_1, X_2, \dots, X_8)$ , esto es,

$$X \sim N_8(\mu, \Sigma),$$

donde  $\mu$  es el vector de medias y  $\Sigma$  la matriz de varianzas-covarianzas. Para realizar inferencia y predicción, supondremos un modelo no informativo a priori como  $p(\mu, \Sigma) \propto |\Sigma|^{-1}$ , véase, por ejemplo, French y Rios Insua (2000).

En tal caso, es conocido que la distribución predictiva de interés es

$$X|\text{datos} \sim t_{12-8} \left( X \mid \bar{X}, \frac{S(12+1)}{12(12-8)} \right) \equiv p(X_1, \dots, X_8),$$

donde

$$\hat{\mu} = \bar{X} = (55.00, 145.33, 128.08, 76.42, 102.17, 60.33, 112.67, 117.5)'$$

y

$$\hat{\Sigma} = S = \begin{pmatrix} 216,18 & 191,82 & 201,64 & 34,45 & 43,64 & -73,36 & 98,73 & 6,09 \\ 191,82 & 456,06 & 347,06 & 63,58 & 169,67 & -126,58 & -43,24 & -416,39 \\ 201,64 & 347,06 & 977,54 & 310,60 & -362,56 & 214,88 & -633,97 & -4,33 \\ 34,45 & 63,58 & 310,60 & 346,45 & 15,47 & 223,85 & -158,85 & 441,64 \\ 43,64 & 169,67 & -362,56 & 15,47 & 1081,06 & -247,42 & 470,79 & 65,98 \\ -73,36 & -126,58 & 214,88 & 223,85 & -247,42 & 456,97 & -315,88 & 589,15 \\ 98,73 & -43,24 & -633,97 & -158,85 & 470,79 & -315,88 & 1632,42 & -129,97 \\ 6,09 & -416,39 & -4,33 & 441,64 & 65,98 & 589,15 & -129,97 & 1739,72 \end{pmatrix}$$

Una vez obtenido el modelo para las rutas  $(X_1, \dots, X_8)$ , se diseña un esquema sencillo para la simulación de flujos:

Desde  $i = 1$  hasta  $N$

$$\text{Generar } (X_1^i, \dots, X_8^i) \sim p(X_1, \dots, X_8) \quad (4.1)$$

A partir de la muestra  $\{X_j^i\}_{i=1}^N$   $j = 1, \dots, 8$ , podemos estimar la probabilidad de saturación en la ruta  $j$ -ésima mediante

$$\frac{\#\{X_j^i: X_j^i \geq 0,7C_j\}}{N},$$

donde  $N$  es el tamaño muestral;  $C_j$  es la capacidad de la ruta correspondiente, que dependerá del número de carriles disponible; 0,7, se adopta porque se asocia el comienzo de la saturación a la situación en la que el flujo del tráfico ocupa el 70 % de la capacidad vial. Para el caso de Ambato, véase Acevedo (2011), se ha estimado que el flujo máximo

por carril en 15 minutos es de 64 vehículos, tomando una velocidad mínima de tránsito de 5 Km/h.

Usando el algoritmo y las estimaciones de  $\mu$  y  $\Sigma$ , se presentan las probabilidades de saturación total por cada una de los potenciales flujos conflictivos, que se incluyen en la Tabla 4.4.

| Ruta      | Capacidad<br>( $C_j$ ) | Probabilidad. de<br>saturación |
|-----------|------------------------|--------------------------------|
| $X_{31}$  | 64                     | 0,288                          |
| $X_{48}$  | 128                    | 0,798                          |
| $X_{120}$ | 64                     | 0,981                          |
| $X_{130}$ | 64                     | 0,745                          |
| $X_{269}$ | 64                     | 0,879                          |
| $X_{274}$ | 64                     | 0,446                          |
| $X_{289}$ | 64                     | 0,886                          |
| $X_{393}$ | 128                    | 0,401                          |

Tabla 4.4. Probabilidad de saturación de las rutas críticas.

Observamos que los flujos  $X_{48}$ ,  $X_{120}$ ,  $X_{130}$ ,  $X_{269}$  y  $X_{289}$ , tienen valores muy altos para las probabilidades de saturación. Por este motivo, se desarrollará un estudio utilizando contramedidas para aliviar los flujos vehiculares. Sin embargo, las rutas  $X_{31}$ ,  $X_{274}$ ,  $X_{393}$ , tienen valores de probabilidad de saturación menores que 0.5, por lo que, aunque en el Capítulo 3 se identificaron como potencialmente conflictivas, no es tan probable que alcancen la saturación indicada. A pesar de ello, se incluirán en el estudio.

#### 4.4. Impacto de las actuaciones sobre el modelo

A continuación se especifica el impacto que las actuaciones  $S_i$  propuestas pueden tener sobre los flujos.  $X_i$  designará el flujo en el O-D  $i$ ;  $\delta_i$ , la capacidad máxima para tal O-D, que será  $C_i = F_i \times \delta$ , donde  $F_i$  es el mínimo número de carriles en la ruta y  $\delta$  la capacidad

máxima por carril. Como medida de saturación utilizaremos  $Pr(X_i > 0,7C_i)$ . Cuando esta probabilidad sea alta, habrá alto riesgo de que el tráfico se sature.

- 1 Con la medida  $S_1$ ,  $X_i$  queda no alterada. Sin embargo, aumenta la capacidad. Así, si el número de carriles pasa de  $F_i$  a  $F'_i$ , la nueva capacidad será  $C'_i = F'_i \times \delta$ . Obsérvese que  $Pr(X_i > 0,7C'_i) \leq Pr(X_i > 0,7C_i)$  con lo que, efectivamente, se reduce el riesgo de saturación.
- 2 Con la medida  $S_2$ , el resultado es similar al anterior, pues aumenta el número de carriles. Así, si este número pasa de  $G_i$  a  $G'_i$ , la nueva capacidad será  $C'_i = G'_i \times \delta$ . En consecuencia, cambia la capacidad de la ruta, pero no el flujo. Como en el caso anterior, se reduce el riesgo de saturación.
- 3 Con la medida  $S_3$ , se reduce la demanda por la ruta O-D correspondiente. Así, si se estima que  $D_i$  es la demanda asociada al servicio relocalizado, se tendría  $X_i|S_3 \sim X_i - D_i$ . Resulta  $Pr(X_i > 0,7C_i|S_3) \leq Pr(X_i > 0,7C_i)$ , con lo que, de nuevo, se reduce el riesgo de saturación.
- 4 Si se produce la restricción por matrícula, en principio, podría parecer que el tráfico se reduce a la mitad si, por ejemplo, se utiliza la restricción par o impar. Sin embargo, realmente será menor la reducción, puesto que algunos conductores tienen varios coches y otros emplearán taxis. Así, si  $\rho_4$  es la fracción de usuarios que viajan empleando un vehículo, bajo la restricción par-impar tenemos que  $X_i|S_4 \sim \rho_4 X_i$ , siendo típicamente,  $\rho_4 \geq 1/2$ . Obsérvese que  $Pr(X_i > 0,7C_i|S_4) \leq Pr(X_i > 0,7C_i)$ , con lo que se tiene el impacto positivo deseado.
- 5 En este caso, suponemos que cada autobús, en promedio, permite transportar entre 20 y 40 personas, dependiendo del horario. Esto es equivalente a reducir entre 20 y 40

vehículos privados. Así, si en un intervalo de 15 minutos es posible incluir entre 1 y 3 pasadas adicionales de autobús, se tendrá

$$X_i|S_5 \sim X_i - a_i M_i,$$

donde  $a_i$  es un valor entre 20 y 40 y  $M_i$  está entre 1 y 3. De nuevo,  $\Pr(X_i > 0,7C_i|S_5) \leq \Pr(X_i > 0,7C_i)$ .

6 Con la medida  $S_6$ , no queda alterada la capacidad física de la vía. Sin embargo, se reducen los tiempos de viaje por lo que puede aumentar el número de vehículos que pueden circular por esta ruta, de manera que aumenta la capacidad de cada vía, pongamos de  $\delta$  a  $\delta_6$ . Así,  $\Pr(X_i > 0,7F_i\delta_6) \leq \Pr(X_i > 0,7C_i)$ .

7 Tendría un efecto similar a la medida  $S_3$ , de manera que

$$X_i|S_7 \sim X_i - B_i,$$

donde  $B_i$  es la parte del tráfico de  $X_i$  que se consigue desviar por la nueva ruta. Nuevamente,  $\Pr(X_i > 0,7C_i|S_7) \leq \Pr(X_i > 0,7C_i)$ .

8 La medida  $S_8$  tiene el efecto de disminuir el número de vehículos  $X_i$  en la vía en los horarios saturados, de manera que

$$X_i|S_8 \sim \rho_8 X_i,$$

donde  $0 < \rho_8 < 1$  representa la parte del tráfico que  $X_i$  mantiene en la ruta después de haber introducido el cambio de horario. Se tiene otra vez  $\Pr(X_i > 0,7C_i|S_8) \leq \Pr(X_i > 0,7C_i)$ .

Para concluir esta sección, resumimos en la Tabla 4.5 cómo construir la muestra y la capacidad por cada una de las contramedidas introducidas. Supondremos que  $\{X_i^k\}$  es la muestra original, cuando no se introduce ninguna medida, obtenida de la aplicación del algoritmo (4.1).

| Contramedida | Muestra tras contramedida | Capacidad máxima                             |
|--------------|---------------------------|--|
| $S_1$        | $\{X_i^k\}$               | Aumenta en $\delta$ por carril adicional     |
| $S_2$        | $\{X_i^k\}$               | Aumenta en $\delta$ por carril adicional     |
| $S_3$        | $\{X_i^k - D_i\}$         | No cambia                                    |
| $S_4$        | $\{\rho_4 X_i^k\}$        | No cambia                                    |
| $S_5$        | $\{X_i^k - a_i M_i\}$     | No cambia                                    |
| $S_6$        | $\{X_i^k\}$               | Aumenta la capacidad por carril a $\delta_6$ |
| $S_7$        | $\{X_i^k - B_i\}$         | No cambia                                    |
| $S_8$        | $\{\rho_8 X_i^k\}$        | No cambia                                    |

Tabla 4.5. Esquema de simulación de las 8 contramedidas.

En consecuencia, no resulta necesario realizar nuevas simulaciones para cada nueva solución que se proponga, ya que bastaría introducir las transformaciones correspondientes arriba indicadas.

En las siguientes tablas se presentan las probabilidades de saturación al aplicar las contramedidas en nuestro estudio de la red de transporte del casco urbano de Ambato. Para cada una de ellas daremos las probabilidades de saturación iniciales y las obtenidas después de implementar las medidas en las rutas pertinentes.

a)  $S_1$ : Las probabilidades de saturación se encuentra en la Tabla 4.6.

| Ruta      | Probabilidad actual | Probabilidad inicial |
|-----------|---------------------|----------------------|
| $X_{120}$ | 0,798               | 0,981                |
| $X_{289}$ | 0,705               | 0,886                |

Tabla 4.6. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_1$ .

Esta política disminuye ligeramente la probabilidad de saturación  $X_{289}$  y  $X_{120}$ , a pesar de que se ha doblado la capacidad en un mismo sentido.

b)  $S_2$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.7.

| Ruta     | Probabilidad actual | Probabilidad inicial |
|----------|---------------------|----------------------|
| $X_{48}$ | 0,691               | 0,798                |

Tabla 4.7. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_2$ .

Vemos que esta política no es suficientemente buena para la ruta  $X_{48}$ , porque su probabilidad de saturación disminuye levemente.

c)  $S_3$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.8, en la que el porcentaje designa el volumen de tráfico que podría ser absorbida por la nueva infraestructura a relocalizar, que serían las oficinas del GAD Municipio de Ambato.

| Ruta      | Probabilidad actual con $X_i - D_i$ |       |       | Probabilidad anterior |
|-----------|-------------------------------------|-------|-------|-----------------------|
|           | 30%                                 | 20%   | 10%   |                       |
| $X_{130}$ | 0,213                               | 0,427 | 0,621 | 0,745                 |

Tabla 4.8. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_3$ .

Así, por ejemplo, bajo esta contramedida, si se redujese el número de vehículos por relocalización un 30 %, la probabilidad de saturación de la ruta  $X_{130}$  sería 0.213, una mejora importante que, sin duda, podría ayudar a descongestionar el tráfico.

- d)  $S_4$  : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.9, donde, se incluye los resultados para distintos valores de  $\rho_4$ , en concreto 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 y 0,9.

| Rutas     | Probabilidad actual con $\rho_4$ |       |       |       |       | Probabilidad inicial |
|-----------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
|           | 0,5                              | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   |                      |
| $X_{31}$  | 0,000                            | 0,000 | 0,003 | 0,041 | 0,133 | 0,288                |
| $X_{48}$  | 0,000                            | 0,000 | 0,036 | 0,238 | 0,565 | 0,798                |
| $X_{120}$ | 0,525                            | 0,769 | 0,884 | 0,931 | 0,968 | 0,981                |
| $X_{130}$ | 0,004                            | 0,056 | 0,213 | 0,427 | 0,621 | 0,745                |
| $X_{269}$ | 0,203                            | 0,436 | 0,625 | 0,751 | 0,836 | 0,879                |
| $X_{274}$ | 0,001                            | 0,017 | 0,072 | 0,174 | 0,314 | 0,446                |
| $X_{289}$ | 0,337                            | 0,539 | 0,687 | 0,787 | 0,851 | 0,886                |
| $X_{393}$ | 0,000                            | 0,011 | 0,049 | 0,144 | 0,277 | 0,401                |

Tabla 4.9. Probabilidades de saturación bajo la contramedida  $S_4$ .

- Con esta contramedida, la probabilidad de saturación de la ruta  $X_{31}$ , es baja para todos los valores de  $\rho_4$  lo que sugiere que muy poco probablemente se alcanzará el nivel de saturación de tráfico relacionado con el 70 % de la capacidad. Casos similares se dan para las rutas  $X_{48}$ ,  $X_{130}$ ,  $X_{274}$  y  $X_{393}$ . Sin embargo, no parece ser tan efectivo para la ruta  $X_{120}$ , que mantiene una probabilidad de saturación alta.
- e)  $S_5$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.10. En ella se muestra que el incremento de buses de transporte público, con un rango de 0 a 3 unidades, con una capacidad de pasajeros de entre 20 y 40 personas, que son valores promedio de los usuarios de un bus de transporte público en la ciudad. Obsérvese que en la columna 0 se refiere a no incluir ningún autobús, con lo que las probabilidades de saturación son las de la Tabla 4.4.

| Número de pasajeros | Rutas     | Número de buses |       |       |       |
|---------------------|-----------|-----------------|-------|-------|-------|
|                     |           | 0               | 1     | 2     | 3     |
| 20                  | $X_{269}$ | 0,879           | 0,715 | 0,493 | 0,262 |
|                     | $X_{289}$ | 0,886           | 0,766 | 0,594 | 0,403 |
| 30                  | $X_{269}$ | 0,879           | 0,609 | 0,262 | 0,065 |
|                     | $X_{289}$ | 0,886           | 0,685 | 0,403 | 0,157 |
| 40                  | $X_{269}$ | 0,879           | 0,493 | 0,121 | 0,007 |
|                     | $X_{289}$ | 0,886           | 0,594 | 0,221 | 0,041 |

Tabla 4.10. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_5$ .

La Tabla 4.10 nos indica que al ubicar dos buses dentro de la ruta, las probabilidades de saturación se reducen de manera importante en todos los casos, y llegamos a tener una reducción relevante de las probabilidades de saturación.

f)  $S_6$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.11

| Rutas     | Probabilidad actual | Probabilidad inicial |
|-----------|---------------------|----------------------|
| $X_{48}$  | 0,460               | 0,798                |
| $X_{130}$ | 0,554               | 0,745                |

Tabla 4.11. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_6$ .

Para realizar esta simulación se toma como referencia el ciclo temporal típico de un semáforo en Ambato, que es 120 segundos, divididos de la siguiente manera; 55% para luz verde, 1,8% para luz ámbar y, finalmente, 43,2% para la luz roja. Esto equivale a 66, 52 y 2 segundos, en cada luz, respectivamente.

Planteamos reducir un 20% el tiempo del rojo, y aumentarlo al tiempo de luz verde en las rutas  $X_{98}, X_{130}$ . Bajo esta nueva configuración tenemos 28 segundos en rojo, 90 segundos en verde y 2 segundos en ámbar. Así, para un período de 15 minutos

tenemos la siguiente distribución de tiempo, 3.5 minutos para rojo, 11.25 minutos para verde y 0.25 minutos para ámbar. Usando esta información, la Tabla 4.11 muestra los resultados de la probabilidad de saturación.

g)  $S_7$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.12

| Ruta      | Probabilidad actual |       |       | Probabilidad inicial |
|-----------|---------------------|-------|-------|----------------------|
|           | 0,3                 | 0,2   | 0,1   |                      |
| $X_{31}$  | 0,080               | 0,043 | 0,138 | 0,288                |
| $X_{130}$ | 0,233               | 0,436 | 0,622 | 0,745                |

Tabla 4.12. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_7$ .

Esta contramedida es importante para mitigar la situación de la ruta  $X_{31}$ , ya que al enviar apenas el 10% del tráfico, la probabilidad de saturación disminuye drásticamente. Para el caso de  $X_{130}$ , es necesario desviar el 30% del flujo vehicular, lo que podría causar saturación en otras vías.

h)  $S_8$ : Las probabilidades de saturación se encuentran en la Tabla 4.13

| Ruta      | Probabilidad actual con $\rho_8$ |       |       |       | Probabilidad inicial |
|-----------|----------------------------------|-------|-------|-------|----------------------|
|           | 0,4                              | 0,3   | 0,2   | 0,1   |                      |
| $X_{130}$ | 0,064                            | 0,233 | 0,436 | 0,622 | 0,745                |
| $X_{274}$ | 0,013                            | 0,083 | 0,193 | 0,331 | 0,446                |
| $X_{393}$ | 0,011                            | 0,070 | 0,164 | 0,287 | 0,401                |

Tabla 4.13. Probabilidad de saturación bajo la contramedida  $S_8$ .

Cambiando los horarios de entrada y salida de las diferentes instituciones que se encuentran a lo largo de las rutas, se reduce la cantidad de vehículos que circulan por ellas, ya que no coincidirían los flujos vehiculares en horas punta. En la Tabla 4.13 se observa que si logramos disminuir en un 20% el número de autos, es decir,

mantenemos el 80% de tráfico actual, las probabilidades de saturación tienen una importante reducción.

#### 4.5. Evaluación del impacto de las intervenciones

El único elemento que falta por especificar para completar el modelo de mejora y expansión de la capacidad de tráfico es introducir una función que nos permita evaluar las carteras de contramedidas  $\lambda \in \Lambda$ , que sería el conjunto de carteras de contramedidas factibles. Esta función objetivo debería incluir:

- Los costes (económicos, políticos, ambientales,...) asociados a introducir las carteras.
- Los beneficios asociados a la reducción de la saturación y mejora de la fluidez del tráfico, pueden evaluarse en tiempo ganado en recorrer una ruta.

Una vez establecidos tales costes, debemos construir la función  $g$  de evaluación. Así, si  $\{X_i^\lambda\}$  designa la salida del modelo de simulación cuando introducimos la intervención  $\lambda$ , resultaría la evaluación  $h(\lambda) = g(\{X_i^\lambda\}, \lambda)$  y el problema a resolver sería optimizar  $h(\lambda)$  s. a  $\lambda \in \Lambda$ .

Una solución sencilla es utilizar como medida de evaluación la máxima probabilidad de saturación en las rutas O-D, definida mediante

$$P_i^\lambda = \Pr(X_i \geq 0.7C_i | \lambda), \quad i = 1, \dots, K$$

$$h(\lambda) = \max_{i=1, \dots, K} P_i^\lambda.$$

Dado  $\lambda$ , la función  $h(\lambda)$  es fácilmente calculable a partir de la salida del modelo de simulación de flujos descrito anteriormente.

Ilustramos la aplicación del método general, con esta función de coste y nuestro ejemplo.

Así, si empleamos una sola contramedida, tenemos el siguiente resumen en la Tabla 4.14.

| RUTA      | O-D   | SOLUCIONES |       |           |           |           |       |           |           |
|-----------|-------|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|
|           |       | S1         | S2    | S3<br>30% | S4<br>0.7 | S5<br>2.0 | S6    | S7<br>0,2 | S8<br>0,8 |
| $X_{31}$  | 41-52 |            |       |           | 0,003     |           |       | 0,043     |           |
| $X_{48}$  | 42-50 |            | 0,691 |           | 0,036     |           | 0,460 |           |           |
| $X_{120}$ | 46-45 | 0,798      |       |           | 0,885     |           |       |           |           |
| $X_{130}$ | 46-56 |            |       | 0,213     | 0,213     |           | 0,554 | 0,436     | 0,436     |
| $X_{269}$ | 54-42 |            |       |           | 0,625     | 0,262     |       |           |           |
| $X_{274}$ | 54-47 |            |       |           | 0,072     |           |       |           | 0,193     |
| $X_{289}$ | 55-43 | 0,705      |       |           | 0,687     | 0,403     |       |           |           |
| $X_{393}$ | 60-52 |            |       |           | 0,049     |           |       |           | 0,164     |

Tabla 4.14. Probabilidades asociadas a las contramedidas.

1. La Tabla 4.15 resume los resultados de aplicar una sola de las contramedidas en el conjunto de la red, incluyendo la última fila el correspondiente valor de la función objetivo  $h(\lambda)$ .

|           |              | S1        |           | S2       | S3        | S4    | S5        |           | S6       |           | S7       |           | S8        |           |           |
|-----------|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | Actual       | $X_{120}$ | $X_{289}$ | $X_{48}$ | $X_{130}$ | Todas | $X_{269}$ | $X_{289}$ | $X_{48}$ | $X_{130}$ | $X_{31}$ | $X_{130}$ | $X_{130}$ | $X_{274}$ | $X_{393}$ |
| $X_{31}$  | 0,288        | 0,288     | 0,288     | 0,288    | 0,288     | 0,003 | 0,288     | 0,288     | 0,288    | 0,288     | 0,043    | 0,288     | 0,288     | 0,288     | 0,288     |
| $X_{48}$  | 0,798        | 0,798     | 0,798     | 0,691    | 0,798     | 0,036 | 0,798     | 0,798     | 0,460    | 0,798     | 0,798    | 0,798     | 0,798     | 0,798     | 0,798     |
| $X_{120}$ | 0,981        | 0,798     | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,885 | 0,981     | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,981     | 0,981     | 0,981     |
| $X_{130}$ | 0,745        | 0,745     | 0,745     | 0,745    | 0,213     | 0,213 | 0,745     | 0,745     | 0,745    | 0,554     | 0,745    | 0,436     | 0,436     | 0,745     | 0,745     |
| $X_{269}$ | 0,879        | 0,879     | 0,879     | 0,879    | 0,879     | 0,625 | 0,262     | 0,879     | 0,879    | 0,879     | 0,879    | 0,879     | 0,879     | 0,879     | 0,879     |
| $X_{274}$ | 0,446        | 0,446     | 0,446     | 0,446    | 0,446     | 0,072 | 0,446     | 0,446     | 0,446    | 0,446     | 0,446    | 0,446     | 0,446     | 0,193     | 0,446     |
| $X_{289}$ | 0,886        | 0,886     | 0,705     | 0,886    | 0,886     | 0,687 | 0,886     | 0,403     | 0,886    | 0,886     | 0,886    | 0,886     | 0,886     | 0,886     | 0,886     |
| $X_{393}$ | 0,401        | 0,401     | 0,401     | 0,401    | 0,401     | 0,049 | 0,401     | 0,401     | 0,401    | 0,401     | 0,401    | 0,401     | 0,401     | 0,401     | 0,164     |
|           | $h(\lambda)$ | 0,886     | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,885 | 0,981     | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,981    | 0,981     | 0,981     | 0,981     | 0,981     |

Tabla 4.15. Probabilidades asociadas a las contramedidas.

Resulta, pues, que la mejor contramedida es  $S_4$ , que afecta a toda la red, siendo ahora la máxima probabilidad de saturación  $h(\lambda)=0,885$ .

2. Como esta probabilidad es todavía muy alta, exploramos la segunda mejor contramedida, supuesto que se ha aplicado  $S_4$ . Así, tenemos los siguientes resultados:

|           |              | S1        |           | S2       | S3        | S5        |           | S6       |           | S7       |           | S8        |           |           |
|-----------|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | Actual       | $X_{120}$ | $X_{289}$ | $X_{48}$ | $X_{130}$ | $X_{269}$ | $X_{289}$ | $X_{48}$ | $X_{130}$ | $X_{31}$ | $X_{130}$ | $X_{130}$ | $X_{274}$ | $X_{393}$ |
| $X_{31}$  | 0,003        | 0,003     | 0,003     | 0,003    | 0,003     | 0,003     | 0,003     | 0,003    | 0,003     | 0,034    | 0,003     | 0,003     | 0,003     | 0,003     |
| $X_{48}$  | 0,036        | 0,036     | 0,036     | 0,016    | 0,036     | 0,036     | 0,036     | 0,001    | 0,036     | 0,036    | 0,036     | 0,036     | 0,036     | 0,036     |
| $X_{120}$ | 0,885        | 0,516     | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885     | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885     | 0,885     | 0,885     |
| $X_{130}$ | 0,213        | 0,213     | 0,213     | 0,213    | 0,004     | 0,213     | 0,213     | 0,213    | 0,056     | 0,213    | 0,134     | 0,016     | 0,213     | 0,213     |
| $X_{269}$ | 0,625        | 0,625     | 0,625     | 0,625    | 0,625     | 0,027     | 0,625     | 0,625    | 0,625     | 0,625    | 0,625     | 0,625     | 0,625     | 0,625     |
| $X_{274}$ | 0,072        | 0,072     | 0,072     | 0,072    | 0,072     | 0,072     | 0,072     | 0,072    | 0,072     | 0,072    | 0,072     | 0,072     | 0,004     | 0,072     |
| $X_{289}$ | 0,687        | 0,687     | 0,353     | 0,687    | 0,687     | 0,687     | 0,103     | 0,687    | 0,687     | 0,687    | 0,687     | 0,687     | 0,687     | 0,687     |
| $X_{393}$ | 0,049        | 0,049     | 0,049     | 0,049    | 0,049     | 0,049     | 0,049     | 0,049    | 0,049     | 0,049    | 0,049     | 0,049     | 0,049     | 0,006     |
|           | $h(\lambda)$ | 0,687     | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885     | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885    | 0,885     | 0,885     | 0,885     | 0,885     |

Tabla 4.16. Probabilidades de saturación de las contramedidas adicionales tras aplicar  $S_4$ .

De esta manera, una vez implementada la medida  $S_4$ , la máxima probabilidad de saturación se reduce a  $h(\lambda)=0,687$ , véase Tabla 4.16, lo que se consigue aplicando la contramedida  $S_1$  en la ruta  $X_{120}$ .

3. Como aún se considera muy alta esta probabilidad, intentamos implantar una tercera medida, como se ilustra en la Tabla 4.17.

|                  |                | S1               | S2              | S3               | S5               |                  | S6              |                  | S7              |                  | S8               |                  |                  |
|------------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | Original       | X <sub>289</sub> | X <sub>48</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>269</sub> | X <sub>289</sub> | X <sub>48</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>31</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>274</sub> | X <sub>393</sub> |
| X <sub>31</sub>  | 0,003          | 0,003            | 0,003           | 0,003            | 0,003            | 0,003            | 0,003           | 0,003            | 0,030           | 0,003            | 0,003            | 0,003            | 0,003            |
| X <sub>48</sub>  | 0,036          | 0,036            | 0,002           | 0,036            | 0,036            | 0,036            | 0,000           | 0,036            | 0,036           | 0,036            | 0,036            | 0,036            | 0,036            |
| X <sub>120</sub> | 0,516          | 0,516            | 0,516           | 0,516            | 0,516            | 0,516            | 0,516           | 0,516            | 0,516           | 0,516            | 0,516            | 0,516            | 0,516            |
| X <sub>130</sub> | 0,213          | 0,213            | 0,213           | 0,003            | 0,213            | 0,213            | 0,213           | 0,002            | 0,213           | 0,016            | 0,004            | 0,213            | 0,213            |
| X <sub>269</sub> | 0,625          | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,008            | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625            | 0,625            | 0,625            |
| X <sub>274</sub> | 0,072          | 0,072            | 0,072           | 0,072            | 0,072            | 0,072            | 0,072           | 0,072            | 0,072           | 0,072            | 0,072            | 0,000            | 0,072            |
| X <sub>289</sub> | 0,687          | 0,353            | 0,687           | 0,687            | 0,687            | 0,006            | 0,687           | 0,687            | 0,687           | 0,687            | 0,687            | 0,687            | 0,687            |
| X <sub>393</sub> | 0,049          | 0,049            | 0,049           | 0,049            | 0,049            | 0,049            | 0,049           | 0,049            | 0,049           | 0,049            | 0,049            | 0,049            | 0,001            |
|                  | h( $\lambda$ ) | 0,625            | 0,687           | 0,687            | 0,687            | 0,625            | 0,687           | 0,687            | 0,687           | 0,687            | 0,687            | 0,687            | 0,687            |

Tabla 4.17. Probabilidades de saturación de las contramedidas adicionales tras aplicar  $S_4$  y  $S_1$  a  $X_{120}$ .

Así, una vez implementadas las medidas  $S_4$  y  $S_1$ , en  $X_{120}$  véase Tabla 4.17, la máxima probabilidad de saturación se reduce a  $h(\lambda) = 0,625$ , que corresponde al caso de implementar la contramedida  $S_5$  en la ruta  $X_{289}$ , o la contramedida  $S_1$  en la  $X_{289}$ . En el caso de tener que implementar una de ellas, hacemos la  $S_1$ , pues no incluye costes en autobuses, como es el caso de  $S_5$ .

4. Finalmente, aplicando una vez más este procedimiento, tenemos:

|                  |                | S2              | S3               | S5               |                  | S6              |                  | S7              |                  | S8               |                  |                  |
|------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | Original       | X <sub>48</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>269</sub> | X <sub>289</sub> | X <sub>48</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>31</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>130</sub> | X <sub>274</sub> | X <sub>393</sub> |
| X <sub>31</sub>  | 0,003          | 0,003           | 0,003            | 0,003            | 0,003            | 0,003           | 0,003            | 0,000           | 0,003            | 0,003            | 0,003            | 0,003            |
| X <sub>48</sub>  | 0,036          | 0,000           | 0,036            | 0,036            | 0,036            | 0,000           | 0,036            | 0,036           | 0,036            | 0,036            | 0,036            | 0,036            |
| X <sub>120</sub> | 0,516          | 0,516           | 0,516            | 0,516            | 0,516            | 0,516           | 0,516            | 0,516           | 0,516            | 0,516            | 0,516            | 0,516            |
| X <sub>130</sub> | 0,213          | 0,213           | 0,000            | 0,213            | 0,213            | 0,213           | 0,000            | 0,213           | 0,001            | 0,000            | 0,213            | 0,213            |
| X <sub>269</sub> | 0,625          | 0,625           | 0,625            | 0,001            | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625            | 0,625            | 0,625            |
| X <sub>274</sub> | 0,072          | 0,072           | 0,072            | 0,072            | 0,072            | 0,072           | 0,072            | 0,072           | 0,072            | 0,072            | 0,000            | 0,072            |
| X <sub>289</sub> | 0,353          | 0,353           | 0,354            | 0,353            | 0,001            | 0,353           | 0,354            | 0,355           | 0,356            | 0,353            | 0,353            | 0,353            |
| X <sub>393</sub> | 0,049          | 0,049           | 0,049            | 0,049            | 0,049            | 0,049           | 0,049            | 0,049           | 0,049            | 0,049            | 0,049            | 0,000            |
|                  | h( $\lambda$ ) | 0,625           | 0,625            | 0,516            | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625           | 0,625            | 0,625            | 0,625            | 0,625            |

Tabla 4.18. Probabilidades de saturación de las contramedidas adicionales tras aplicar  $S_4$  y  $S_1$  en  $X_{289}$  y  $X_{120}$ .

En la Tabla 4.18 se observa que la mejor contramedida adicional es  $S_5$ , aplicada a  $X_{269}$ , siendo  $h(\lambda)=0,516$ . Obsérvese que esta máxima probabilidad de saturación se alcanza para la ruta  $X_{120}$  para lo que no hay contramedidas adicionales, con lo que concluiría el proceso.

Vemos, pues, que para reducir significativamente la máxima probabilidad de saturación debemos implementar tres políticas simultáneamente: restringir la circulación por el número de matrícula en toda la red, liberar carriles en las rutas  $X_{120}$  y  $X_{289}$  y aumentar el número de autobuses de transporte público en la ruta  $X_{269}$ .

A continuación, podemos realizar una nueva clasificación de las rutas conflictivas originadas y verificar si las políticas implementadas tienen efecto sobre la red. En la Tabla 4.19 se observa que la mayoría de las rutas dejan de ser saturadas tras la implementación simultánea de las tres contramedidas seleccionadas, tomando como criterio que la probabilidad de saturación sea menor que 0,5.

| RUTA      | O-D   | Saturado |
|-----------|-------|----------|
| $X_{31}$  | 41-52 | no       |
| $X_{48}$  | 42-50 | no       |
| $X_{120}$ | 46-45 | si       |
| $X_{130}$ | 46-56 | no       |
| $X_{269}$ | 54-42 | no       |
| $X_{274}$ | 54-47 | no       |
| $X_{289}$ | 55-43 | no       |
| $X_{393}$ | 60-52 | no       |

Tabla 4.19. Comparación de la saturación de las rutas implementar las políticas.

Concluimos, pues, que se consigue una reducción notable de los problemas de saturación de tráfico en la ciudad con la cartera de contramedidas propuesta. Quedarían solo ciertos problemas en la ruta  $X_{120}$ , con probabilidad de saturación 0,516. Una posibilidad para paliar esto sería aumentar la vigilancia en esa ruta,

incrementando las multas sobre los vehículos que aparcan en lugares prohibidos, cosa demasiado habitual en la misma.

#### 4.6. Minimización de tiempos de viaje

En la sección anterior hemos ilustrado la metodología de expansión de la capacidad con una función objetivo sencilla: la máxima probabilidad de saturación en la red. Este valor podría verse como una medida de la máxima incomodidad producida por el tráfico en la ciudad. Sin embargo, no hace referencia a los aspectos económicos asociados al mismo, centrándose, además, en la peor situación en la ciudad. Para completar el estudio, introducimos otra función objetivo que tiene en cuenta los tiempos de viaje esperados en las rutas principales de la red empleados por el conjunto de vehículos que la utilizan.

Para estimar el tiempo empleado gastado en viajes, que sería nuestra función objetivo a minimizar, introducimos primero diversos aspectos relativos al mismo.

##### **Tiempo de viaje sobre una ruta**

Desde el punto de vista de un usuario individual, su interés es minimizar su tiempo de viaje. Es así que emplearemos esta variable utilizando la relación

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{V} \quad (4.2)$$

donde  $V$  es la velocidad,  $\Delta d$  es la distancia de la ruta y  $\Delta t$  el tiempo de viaje que se necesita para recorrer la misma. Como es conocido, el tiempo depende de la velocidad que, a su vez, dependerá del tráfico.

Así, en función de los estudios realizados por Acevedo (2011), y la experiencia profesional desarrollada en el GAD de Ambato, ajustamos una función que relaciona la

velocidad con el número de vehículos HCM (2000), dada por (4.3), que se empleará en (4.2). A esta función le hemos añadido particularidades de la ciudad, y otros parámetros propios de la dinámica del tráfico en Ambato, en relación con cambios bruscos de pendientes, reducciones de la geometría en ciertos tramos de vías, etc, quedando, en definitiva, la función

$$v(X) = \begin{cases} -0.000131X^3 + 0.02836X^2 - 2.033X + 50.07, & \text{si } X \leq \textit{umbral} \\ 0.125 & , \text{si } X > \textit{umbral} \end{cases} \quad (4.3)$$

donde *umbral* es un valor obtenido experimentalmente, siendo en nuestro caso 100; *V* es la velocidad, medida en Km/h; y *X* es el número de vehículos. La Figura 4.2 muestra la velocidad en función del número de vehículos, donde se limita la velocidad a un máximo de 50 Km/h y a un mínimo de 0 Km/h, en el área urbana, aplicado en un carril.

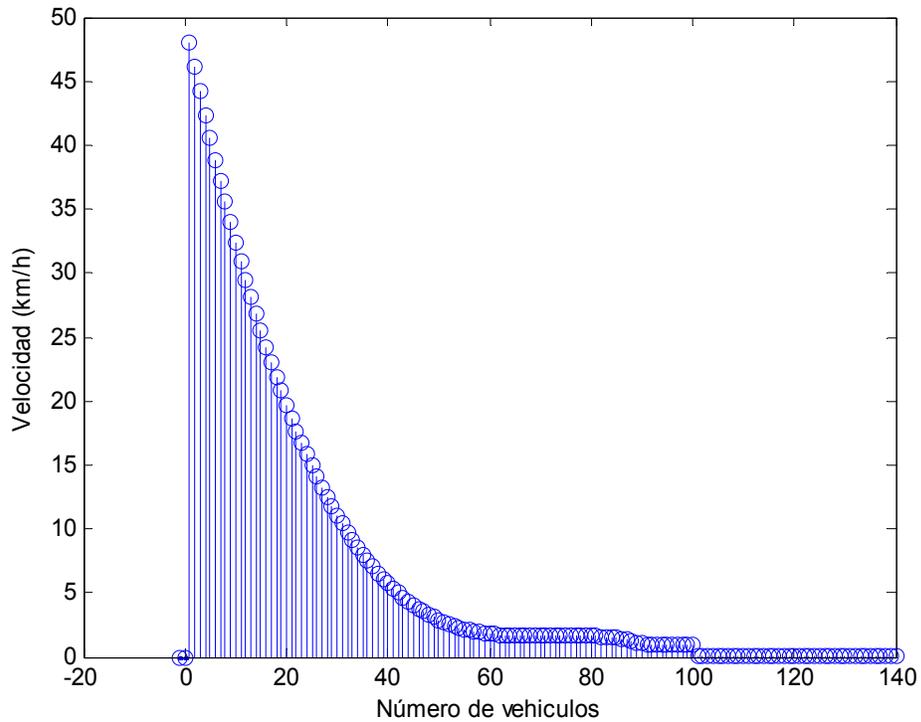


Figura 4.2. Velocidad en función del número de vehículos.

Para ilustrar esta relación, analicemos un tramo de 99 metros de la ruta  $X_{393}$  (nodo 60 al nodo 53, de la Figura 3.13), que hemos identificado como conflictiva. Empleando (4.2), y los datos de salida del AG en la tabla 3.12 con un valor de 118 vehículos en un cuarto de hora, tenemos:

$$\Delta t_{393} = \frac{99}{0.990\left(\frac{1000}{3600}\right)} = 360,0 \text{ Segundos}$$

equivalente a 6 minutos. Este es un tiempo claramente excesivo para una distancia muy corta, de apenas 99 metros, lo que, obviamente, significa tiempo perdido en movilidad debido a la congestión vehicular. Por otra parte, se estima que la velocidad promedio de una persona a pie es de 0,833 metros por segundo. Así, caminando, un individuo se demoraría aproximadamente 1,37 minutos en recorrer los 99 metros, un tiempo muy inferior al antes señalado. Esto ejemplifica de manera clara el problema que sufren los ciudadanos de Ambato en su transporte por la ciudad en horas punta.

La Tabla 4.20 presenta las distancias de las rutas conflictivas en nuestro ejemplo.

| Ruta      | Distancia |
|-----------|-----------|
| $X_{31}$  | 252,33    |
| $X_{48}$  | 322,34    |
| $X_{120}$ | 182,20    |
| $X_{130}$ | 316,08    |
| $X_{269}$ | 429,40    |
| $X_{274}$ | 307,35    |
| $X_{289}$ | 310,96    |
| $X_{393}$ | 394,10    |

Tabla 4.20. Distancias de las rutas conflictivas.

La Figura 4.3 muestra una aproximación a las velocidades esperadas en metros/segundo en las rutas de interés para los flujos encontrados en el capítulo 3 que, como vemos, son realmente bajas en varios casos, ( $X_{48}, X_{120}, X_{269}, X_{289}, X_{393}$ ).

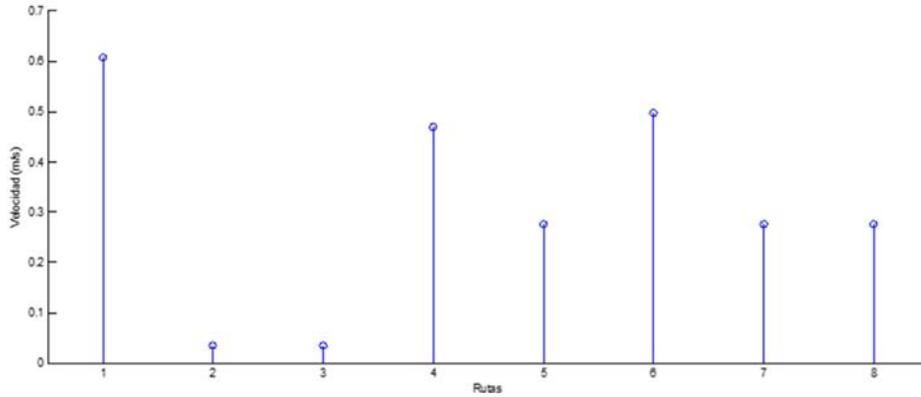


Figura 4.3. Velocidad en función del número de vehículos en las rutas conflictivas.

Usando (4.2) tenemos el siguiente gráfico de la aproximación a los tiempos esperados de viaje en cada una de las rutas, reflejados en la Figura 4.4, que, de nuevo sugiere tiempos excesivos para varios de los tramos, algunos cercanos a 160 minutos.

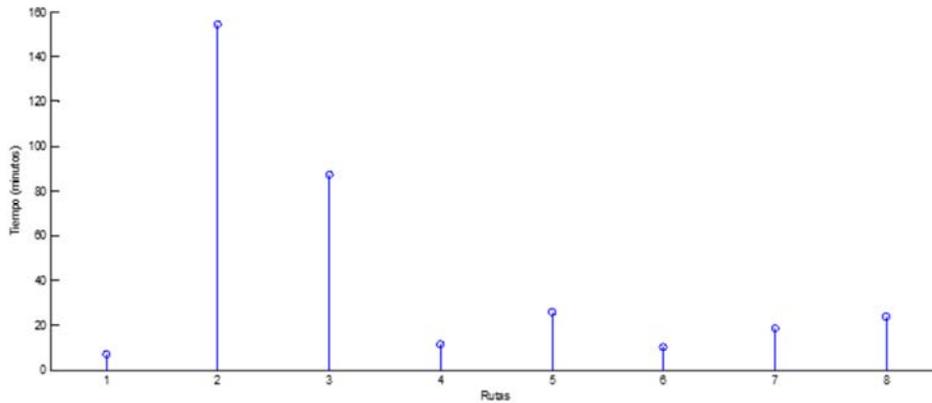


Figura 4.4. Tiempos de recorridos, en minutos, de las rutas conflictivas originales.

## Tiempo de viaje sobre la red

Para estimar el tiempo esperado total de recorrido en la red cuando implantamos la cartera de contramedidas  $\lambda$ , usamos (4.2) para obtener

$$\Delta t(\lambda) = \sum_{j=1}^8 E(X_j|\lambda) \frac{d_j}{V_j(\lambda)} \quad (4.4)$$

donde  $X_j|\lambda$  y  $V_j(\lambda)$  son, respectivamente, el valor del flujo y la velocidad asociados a la cartera de contramedidas  $\lambda$ ;  $d_j$  es la distancia total en la ruta  $j$ -ésima,  $j = 1, \dots, 8$ , y  $E$  designa a la esperanza.

A partir de aquí nos interesa minimizar el tiempo total esperado de viaje, es decir, resolveremos el problema

$$\min \Delta t(\lambda) \quad (4.5)$$

$$s. a \quad \lambda \in \Lambda$$

Obsérvese que para resolver (4.5) empleamos todas las rutas conflictivas y consideramos las contramedidas identificadas para aliviar el tráfico vehicular.

Finalmente, para completar la especificación del problema, aproximaremos la velocidad esperada asociada a una contramedida mediante la velocidad asociada al flujo esperado cuando se implementa tal contramedida, de manera que

$$V_j(\lambda) = V(E(X_j|\lambda)).$$

Resulta así que aproximaremos la función objetivo mediante

$$\Delta t(\lambda) = \sum_{j=1}^8 E(X_j(\lambda)) \frac{d_j}{V(E(X_j|\lambda))}$$

Procedemos, entonces, como en la sección anterior para encontrar las carteras adecuadas, buscando, en primer lugar, la contramedida más eficaz, esto es, la que reduce más el

tiempo esperado empleado en las rutas O-D críticas por los usuarios. Así, se implanta una contramedida generando los tiempos empleados en las rutas, como se muestra en la Tabla 4.21.

|            |          | S1       |          | S2       | S3       | S4      | S5       |          | S6       |          | S7       |          | S8       |          |          |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            | Actual   | X120     | X289     | X48      | X130     | Todos   | X269     | X289     | X48      | X130     | X31      | X130     | X130     | X274     | X393     |
| X31        | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 2,47    | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 0,49     | 6,94     | 6,94     | 6,94     | 6,94     |
| X48        | 154,72   | 154,72   | 154,72   | 11,56    | 154,72   | 19,54   | 154,72   | 154,72   | 19,54    | 154,72   | 154,72   | 154,72   | 154,72   | 154,72   | 154,72   |
| X120       | 87,46    | 11,04    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 10,66   | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    | 87,46    |
| X130       | 11,24    | 11,24    | 11,24    | 11,24    | 1,13     | 7,83    | 11,24    | 11,24    | 11,24    | 9,72     | 11,24    | 0,69     | 0,75     | 11,24    | 11,24    |
| X269       | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 15,52   | 15,44    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    | 26,02    |
| X274       | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 3,71    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 10,31    | 0,63     | 10,31    |
| X289       | 18,85    | 18,85    | 11,18    | 18,85    | 18,85    | 11,16   | 18,85    | 11,78    | 18,85    | 18,85    | 18,85    | 18,85    | 18,85    | 18,85    | 18,85    |
| X393       | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 14,46   | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 23,88    | 1,46     |
| $\Delta t$ | 43138,44 | 33351,39 | 42275,15 | 22333,11 | 42366,12 | 9703,74 | 42057,01 | 42342,80 | 23491,66 | 43022,37 | 42783,77 | 42332,49 | 42337,46 | 42553,99 | 40502,94 |

Tabla 4.21. Tiempos empleados en las rutas O-D.

La fila  $\Delta t$  indica el tiempo medio total esperado de viaje de los vehículos que recorren las rutas críticas. Así, se observa que la política  $S_4$ , que tiene un valor de 9703 minutos, es mínima en comparación con las otras contramedidas, con lo que resulta la mejor acción a implementar. Si tal tiempo resulta excesivo, debemos buscar una contramedida adicional, como se ilustra en la Tabla 4.22.

|            |         | S1      |         | S2      | S3      | S5      |         | S6      |         | S7      |         | S8      |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|            | Actual  | X120    | X289    | X48     | X130    | X269    | X289    | X48     | X130    | X31     | X130    | X130    | X274    | X393    |
| X31        | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 0,33    | 2,47    | 2,47    | 2,47    | 2,47    |
| X48        | 19,54   | 19,54   | 19,54   | 5,683   | 19,54   | 19,54   | 19,54   | 12,163  | 19,54   | 19,54   | 19,54   | 19,54   | 19,54   | 19,54   |
| X120       | 10,66   | 6,56    | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   | 10,66   |
| X130       | 7,83    | 7,83    | 7,83    | 7,83    | 0,834   | 7,83    | 7,83    | 7,83    | 6,538   | 7,83    | 0,43    | 0,585   | 7,83    | 7,83    |
| X269       | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 4,83    | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   | 15,52   |
| X274       | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 3,71    | 0,41    | 3,71    |
| X289       | 11,16   | 11,16   | 8,164   | 11,16   | 11,16   | 11,16   | 2,07    | 11,16   | 11,16   | 11,16   | 11,16   | 11,16   | 11,16   | 11,16   |
| X393       | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 14,46   | 0,57    |
| $\Delta t$ | 9703,74 | 9177,96 | 9366,60 | 7690,51 | 9169,04 | 8611,76 | 8679,71 | 8632,25 | 9604,94 | 9585,97 | 9138,15 | 9150,02 | 9504,69 | 8072,59 |

Tabla 4.22. Tiempo empleado y coste aplicado las contramedidas

Así, analizando la Tabla 4.22, observamos que la mejor contramedida, tras haber aplicado  $S_4$ , es la contramedida  $S_2$  aplicada a la ruta  $X_{48}$ . De considerarse excesivo el tiempo total esperado por los usuarios de la ruta, se procedería en forma similar, reiterando el proceso hasta que la reducción fuese suficiente.

Obsérvese que, con este criterio puede no ser fácil (o natural) decidir si tal reducción ha sido suficiente. Una forma interesante de hacerlo pasaría por evaluar económicamente los tiempos de viaje. Como cota, podemos buscar una estimación basada en el coste de un minuto en taxi en Ambato, que es de 0,369 dólares. En tal caso, la evaluación de costes sería como en la Tabla 4.23.

|              | Actual   | S4      | S2 y S4 |
|--------------|----------|---------|---------|
| Tiempo total | 43138,44 | 9703,74 | 7690,51 |
| Coste (USD)  | 15918,08 | 3580,68 | 2837,79 |

Tabla 4.23. Tiempo empleado y coste aplicado las contramedidas.

Al implementar la contramedida  $S_4$ , se tiene un ahorro económico del 77,50 % en el recorrido de la red en los 15 minutos; para las medidas  $S_2$ ,  $S_4$  se tiene un porcentaje de 20,74 % en ahorro, y así sucesivamente.

Para concluir, obsérvese que para hacer una comparación más justa deberíamos, además, incluir los costes de implementación de las contramedidas.

#### 4.7. Conclusiones

En este capítulo se ha introducido una metodología para ayudar a decidir las mejores intervenciones de cara a mejorar el tráfico en una ciudad expandiendo su capacidad. La

metodología construye un modelo estocástico de los flujos O-D en las principales rutas de la ciudad basado en las salidas del AG empleado. Después estudia el impacto de las distintas contramedidas sobre el modelo de tráfico. Mediante simulación Montecarlo podemos muestrear del modelo identificado y evaluar con una función objetiva adecuada tales intervenciones.

Hemos considerado, como ejemplos de función objetivo la máxima probabilidad de saturación y el tiempo esperado de viaje, al que hemos asociado una evaluación económica. En el ejemplo considerado hemos estudiado la determinación de una cartera óptima por pasos. En casos continuos podría usarse un metamodelo de regresión. El ejemplo mostrado indica la capacidad de la metodología para mejorar el tráfico en general y, en particular, en la ciudad de Ambato.



## Capítulo 5

### Conclusiones y trabajos futuros

#### 5.1. Conclusiones

La congestión de tráfico vehicular en las ciudades, en general, y en el casco urbano de la ciudad de Ambato, se ha agudizado en los últimos tiempos, debido a los problemas ya mencionados en el primer capítulo, entre los que destacan el incremento de los vehículos de transporte privado. A todo ello, se ha unido la falta de planificación urbana con lo que y al aumentar el número de automóviles se exagera la necesidad de una mayor capacidad vial, Por ello, en esta tesis se han planteado un conjunto de soluciones para resolver esta problemática.

Para llegar a estas soluciones, se propuso como objetivo diseñar una metodología que permita expandir la capacidad de tráfico de una red urbana de manera óptima. Tal metodología se ha aplicado en Ambato para aportar soluciones al grave problema de tráfico que se presenta en la actualidad.

Tal objetivo general se refleja en los siguientes objetivos específicos:

- Introducir un método para la estimación de los flujos origen destino O-D en una red urbana a partir de las mediciones de volúmenes de tráfico.
- Introducir un modelo estocástico basado en flujos O-D. que permitan la simulación de tráfico bajo distintas condiciones, basadas a intervenciones sobre el tráfico.
- Introducir esquemas que permitan detectar rutas O-D críticas en una red urbana.

- Introducir una metodología de simulación que permita identificar las mejores intervenciones de cara a mitigar los problemas en los flujos O-D críticos.
- Aplicar la metodología anterior para resolver los problemas de tráfico en la red de Ambato.

Para cumplir los objetivos anteriores, fue necesario, en primer lugar, realizar un análisis y el diagnóstico del tráfico del casco urbano de la ciudad de Ambato.

- En Ambato, el número de autos ha pasado de 25.510 a 67.000 en sólo seis años (2006-2012) lo que ha generado un gran número de problemas.
- Existe desconocimiento y/o falta de acatamiento de las leyes de tránsito, transporte y seguridad vial por parte de todos los actores viales, como son conductores, peatones o vendedores ambulantes.
- Los usuarios necesitan una forma rápida de trasladarse dentro de la ciudad, para realizar diferentes actividades, por lo que necesitan utilizar distintos medios de transporte de manera eficiente, amigable, y a un precio razonable.

Una vez identificado la problemática de transporte, con la información de tráfico disponible, se determinaron las zonas de mayor congestión de flujos vehiculares. Una de ellas es el casco urbano, delimitado al norte por la calle Lizardo Ruiz, al sur por la avenida 12 de Noviembre, al este por la calle Gonzáles Suárez y al oeste por la calle Francisco Flor. Esta zona cubre un área de 2,52 Km<sup>2</sup> donde se concentra el 70 % de la población urbana de Ambato.

- Una vez determinado el estado de la situación vehicular, se modelizó el problema de tráfico usando el método de la matriz origen-destino O-D. Este modelo se expresa a través del conjunto de ecuaciones  $Y = AX$  donde  $A$  es la matriz de enlaces y rutas,

$Y$  es el tráfico en las vías y  $X$  es el flujo vehicular. Esta última variable es la incógnita de este problema. Todos los métodos disponibles requieren gran esfuerzo computacional para alcanzar una solución y trabajan bajo condiciones particulares en cada caso específico.

- Como alternativa, se ha presentado un nuevo método de solución basado en Algoritmo Genéticos (AG), donde se transforma el problema de estimación de la matriz O-D a un problema de optimización. Luego, se busca sucesivamente la mejor solución entre un conjunto de soluciones factibles, emulando la evolución biológica, utilizando operaciones de selección, mutación y cruce. La función de coste asociada al problema de la matriz O-D es  $F(x) = ||y - A_1x_1 - A_1x_2||$ , bajo ciertas restricciones sobre un conjunto de soluciones  $S = \{x \in \mathbb{R}^n; x > 0\}$ .
- Después de obtener los resultados de AG, se han plasmado de manera gráfica sobre el mapa del casco urbano. Esto permite identificar las rutas en las que resulta necesario actuar para mejorar el tráfico, así como las rutas subutilizadas que pueden aprovecharse, para desplazar tráfico.
- Finalmente, resulta necesaria la simulación de un conjunto de políticas que pueda mejorar el flujo vehicular.
- Esta metodología propone una serie de contramedidas que pueden aliviar el problema como cambiar el sentido de las calles, relocalizar servicios, aumentar el número de carriles, restringir la circulación vehicular, aumentar el número de autobuses de transporte público, eliminar o cambiar puntos de semáforos o desviar rutas. Estas

contramedidas son efectivas para mejorar la movilidad, ya que la probabilidad de saturación se reduce significativamente en la mayoría de los casos.

Se cumplen, en definitiva, los objetivos planteados en la tesis.

## 5.2. Trabajos futuros

Se describen a continuación algunos de los trabajos relevantes que pueden desarrollarse a futuro.

- El AG presentado se puede mejorar desde el punto de vista computacional, en especial acortando los tiempos de respuesta. En este caso, se podría trasladar el algoritmo a un entorno paralelo para alcanzar esta mejora. Con todo ello, conseguiríamos acelerar los experimentos y acometer redes de tamaño mayor.
- También sería interesante, comparar nuestra estrategia con otros métodos de los mostrados en la literatura y producir, tal vez, un método híbrido.
- Tras el éxito alcanzado en los pequeños segmentos de red considerados, el modelo debería probarse en el conjunto de la red de Ambato, teniendo en cuenta que comienzan a surgir problemas de tráfico en su periferia debido al crecimiento de la ciudad. Para ello sería necesario, obtener información vehicular en toda la ciudad con datos actualizados.
- De tener éxito en el punto anterior, podría pensarse en aplicar el modelo a otras ciudades de tamaño similar como Latacunga o Riobamba, e incluso, más adelante, a poblaciones de mayor tamaño.
- Con este fin, sería imprescindible desarrollar un sistema informático que ayude a desplegar automáticamente la metodología propuesta.

- Desde el punto de vista metodológico, sería también interesante hacer un catálogo de posibles funciones objetivas de interés, más allá de las dos empleadas en esta tesis. En el caso que los objetivos que se planteasen en estas nuevas funciones objetivas fuesen conflictivas, se podrían explorar soluciones de Pareto.
- Finalmente, también sería interesante explorar el empleo de modelos de mixturas en la aproximación de flujos O-D, en lugar de la aproximación normal adoptada en este trabajo.



## Bibliografía

Acevedo, J. (2011). *Estudio de Ingeniería de Tránsito para la Semaforización Centralizada en el Casco Urbano de la Ciudad de Ambato*. Ambato: Ilustre Municipio de Ambato.

Akcelik, R. (1981). *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis* (Vol. 123). Vermont South, Victoria 3133: ARRB Group Limited.

Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Jerry Banks. Atlanta: EMP books.

Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. New York: Springer.

Beckmann, M., Guire, C. y Winsten, C. (1955). *Studies in the Economics of the Transportation*. Santa Mónica, New Haven: The Rand Corporation.

Cal, R. y Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito* (8 ed.). Mexico: Alfa Omega Grupo Editor, S.A.

Cao, J., Yu, B., Davis, D. y Vander, S. (2000). Time-Varying Network tomography. *Journal of the American Statistical Association*, 95(452), 1063-1075.

Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, J., Garcia, P., Alguacil, R. y Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Mexico DF: Alfaomega Grupo Editor.

Castillo, E., Menéndez, J. y Sánchez Cambronero, S. (2008). Predicting traffic flow using Bayesian networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(5), 481-509.

- Castillo, E., Menéndez, J. y Sánchez Cambronero, S. (2008). Traffic Estimation and optimal counting location without path enumeration using Bayesian networks. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(3), 189-207.
- Castillo, E., Nogal, M., Menéndez, J., Sánchez-Cambronero, S. y Jiménez, P. (2011). Stochastic Demand Dynamic Traffic Models Using Generalized Beta-Gaussian Bayesian Networks. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-17.
- Chib, S. y Greenberg, E. (1995). Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm. *The American Statistician*, 49(4), 327-335.
- Daganzo, C. y Sheffi, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, 11, 253-274.
- Fernández, R. y Valenzuela, E. (2004). Gestión Ambiental de Tránsito: Cómo la Ingeniería de Transporte puede contribuir a la mejoría del ambiente urbano. *Eure*, XXIX (89), 97 -107.
- French, S. y Rios Insua, D. (2000). *Statistical Decision Theory*. London: Edward Arnold.
- Haupt, R. y Haupt, S. (2004). *Practical Genetic Algorithms* (2 ed.). New Jersey: Wiley-Interscience publication.
- Hazelton, M. L. (2001). Estimation of origin–destination trip rates in Leicester. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 50(4), 423- 433.
- Hazelton, M. L. (2003). Some Comments on origin–destination matrix estimation. *Transportation Research*(37A), 811-822.
- Head, K. y Larry. (1995). Event-Based Short-Term Traffic Flow Prediction Model. *Transportation research record 1510*, 46-52.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015a). <http://www.inec.gob.ec>. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de [http://www.inec.gob.ec/cpv/?TB\\_iframe=true&height=450&width=800'%20rel=slbox](http://www.inec.gob.ec/cpv/?TB_iframe=true&height=450&width=800'%20rel=slbox)

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015b). <http://www.ecuadorencifras.gob.ec>. Recuperado el 25 de Agosto de 2015, de [inec.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec): <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales>

Kirby, M. y Sirovich, L. (1990). Application of the Karhunen-Lokve Procedure for the Characterization of Human Faces. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, 12 (1), 103-108.

Lee, S. y Fambro, D. (1999). Application of Subset Autoregressive Integrated Moving Average Model for Short-Term Freeway Traffic Volume Forecasting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.*(1678), 179-188.

Levinson, D. (2003). The value of advanced traveler information systems for route choice. *En: Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 11(1), 75-87.

Lin, Y. y Cai, Y. (2003). Kalman Filtering Based Dynamic O-D Matrix Estimation and Prediction for Traffic Systems. *Systems Engineering-theory y Practice*, 10, 1515 - 1520.

Maher, M. J. y Zhang, X. (1999). Algorithms for the solution of the congested trip matrix estimation problem. (4, Ed.) *Transportation and Traffic Theory. Proceeding of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 445-469.

Municipio de Ambato. (2009). Plan de Ordenamiento Territorial Ambato 2020. *Plan de Ordenamiento Territorial Ambato 2020*. Ambato.

National Research Council. (2000). *(HCM2000)- Transportation Research Board*. Washington DC: National Academy of Sciences.

Okutani, I. y Stephanedes, Y. J. (1984). Dynamic prediction of traffic volume through Kalman filtering theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(1), 1-11.

Praskher, J. N. y Bekhor, S. (2004). Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review. *Transportation Reviews*, 24(4), 437-463.

Sánchez-Cambronero, S., Castillo, E., Menéndez M. y Jiménez, P. (2010). Dealing with error recovery in traffic flow prediction using Bayesian networks based on license plate scanning data. *Journal of transportation engineering*, 137(9), 615-629.

Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods*. New Jersey: Prentice-Hall.

Solórzano, P. (2008). *Estudio del tráfico vehicular de la ciudad de Ambato*. Quito.

Sun, S., Zhang, C. y Yu, G. (2006). A Bayesian network approach to traffic flow forecasting. *IEEE Transactions on, Intelligent Transportation Systems*, 7(1), 124-132.

Taha, H. (2004). *Investigación de Operaciones*. Mexico: Pearson Educación.

Tebaldi, C. y West, M. (1998). Bayesian Inference on Network Traffic Using Link. *Journal of the American Statistical Association*, vol 93(442), 557-576.

The Institution of Highway and Transportation (IHT). (1997). *Transport in the urban environment*. London: The Institution of Highway and Transportation.

Van, D. Voort, M., Dougherty, M. y Watson, S. (1996). Combining Kohonen maps with ARIMA time series models to forecast traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(5), 307-318.

Vardi, Y. (1996). Network tomography: estimating source source destination traffic intensities from link data. *Journal of the American Statistical Asociation* 91(433), 365–77.

Verastegui, D. (2011). *Estimación de matrices origen-destino Y calibración de parámetros en El problema de asignación de tráfico en redes congestionadas*. Ciudad Real: Universidad Castilla la Mancha.

Voton, S. y Bedo, J. (2004). Network Traffic Matrix: how can one learn the prior distributions from the link counts only. *IEEE Communications Society* (4), 2138-2142.

Wardrop, J. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Engineering Divisions*, 3(1), 325- 378.

Williams, B. y Hoel, L. (2003). Modeling and forecasting vehicular traffic flow as a seasonal ARIMA process: Theoretical basis and empirical results. *Journal of transportation engineering*, 129(6), 664-672.

Willumsen, L. (1978). Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts – A Review. *Institute of Transport Studies*(99), 1-59.

Yang, H., Sasaki, T., Lida, Y. y Asakura, Y. (1992). Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 26(6), 417-434.

Zhang, J. (2006). Origin-Destination Network Tomography with Bayesian Inversion Approach. *Computer Society*, 38-44.



## **Anexo 1**

### **A.- Recopilación y análisis de la información primaria**

A fin de iniciar la recolección de la información se procedió a realizar la medición de volúmenes vehiculares en el horario comprendido entre las 06:30 - 09:00, durante la mañana, 12:00 – 14:00, durante la tarde, y de las 16:00 hasta las 19:00 horas, durante la noche para los vehículos que circulan en el casco central urbano de Ambato.

#### **Formato para recolección de datos de la distribución del volumen de arribos**

En la siguiente tabla se presenta el formato utilizado para la recolección de los datos.

**Fuente:** Formulario tomado del estudio del Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato.

En el formulario de datos del Plan Maestro de tráfico de la ciudad de Ambato, se puede observar, un ejemplo de la toma de datos en uno de los aforos de volúmenes de arribos vehiculares, donde existe mayor conflicto, los mismos que se pueden observar en la Tabla 5.1. Para el ejemplo del formulario, se pudieron determinar los siguientes datos en cada uno de los puntos de aforo marcados en el mapa.

## Distribución del volumen de arribos

LUGAR: AMBATO

CRUCE: 1

GRUPO No: 1

DIRECCIÓN: GONZÁLES SUÁREZ Y 12 DE NOVIEMBRE

No, CARRILES TEÓRICO: 2

No, CARRILES EFECTIVO: 2

2

ANCHO EFECTIVO: 7,0 M

| INTERVALO              | TIPO DE VEHÍCULO |    |    | Vehic Equiv | Inter pico | Intervalo              | TIPO DE VEHÍCULO |    |    | Vehic Equiv | Inter pico | Intervalo      | Tipo de vehículo       |    |   | Vehic Equiv | Inter pico |     |
|------------------------|------------------|----|----|-------------|------------|------------------------|------------------|----|----|-------------|------------|----------------|------------------------|----|---|-------------|------------|-----|
|                        | A                | B  | C  |             |            |                        | A                | B  | C  |             |            |                | A                      | B  | C |             |            |     |
| 6:30 6:45              |                  |    |    |             |            | 12:00<br>12:15         | 203              | 18 | 3  | 247         |            | 18:00<br>18:15 | 168                    | 21 | 6 | 225         |            |     |
| 6:45 7:00              | 146              | 25 | 4  | 198         |            | 12:15<br>12:30         | 186              | 16 | 7  | 236         |            | 18:15<br>18:30 | 218                    | 18 | 7 | 272         |            |     |
| 7:00 7:15              | 163              | 23 | 4  | 223         |            | 12:30<br>12:45         | 207              | 15 | 7  | 255         |            | 18:30<br>18:45 | 160                    | 17 | 2 | 199         |            |     |
| 7:15 7:30              | <sup>144</sup>   | 23 | 7  | 208         | 629        | 12:45<br>13:00         | 175              | 20 | 2  | 220         | 957        | 18:45<br>19:00 | 188                    | 22 | 1 | 235         | 930        |     |
| 7:30 7:45              | 189              | 25 | 10 | 260         | 889        | 13:00<br>13:15         | 184              | 18 | 7  | 238         | 948        |                |                        |    |   | 0           | 705        |     |
| 7:45 8:00              | 167              | 18 | 3  | 225         | 915        | 13:15<br>13:30         | 149              | 17 | 2  | 188         | 900        |                |                        |    |   | 0           | 434        |     |
| 8:00 8:15              | 182              | 21 | 4  | 228         | 920        | 13:30<br>13:45         | 169              | 16 | 4  | 211         | 857        |                |                        |    |   | 0           | 235        |     |
| 8:15 8:30              | 171              | 18 | 6  | 228         | 941        | 13:45<br>14,00         | 151              | 20 | 9  | 214         | 850        |                |                        |    |   | 0           | 0          |     |
| 8:30 8:45              | 180              | 27 | 6  | 231         | 912        | 16:00<br>16:15         | 175              | 25 | 9  | 248         |            |                |                        |    |   |             |            |     |
| 8:45 9:00              | 188              | 17 | 6  | 237         | 924        | 16:15<br>16:30         | 182              | 17 | 8  | 236         |            |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 16:30 16<br>45         | 167              | 20 | 10 | 232         |            |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 16:45<br>17:00         | 211              | 21 | 5  | 266         | 981        |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 17,00<br>17:15         | 166              | 15 | 5  | 209         | 942        |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 17:15<br>17:30         | 195              | 19 | 14 | 268         | 974        |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 17:30<br>17:45         | 180              | 14 | 8  | 228         | 970        |                |                        |    |   |             |            |     |
|                        |                  |    |    |             |            | 17:45<br>18:00         | 183              | 17 | 6  | 232         | 937        |                |                        |    |   |             |            |     |
| Valor Max, Hora Pico = |                  |    |    |             | 941        | Valor Max, Hora Pico = |                  |    |    |             | 957        | 981            | Valor Max, Hora Pico = |    |   |             |            | 930 |

| OBSERVACIONES GENERALES SOBRE EL AFORO |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| INTERVALO                              |  |  |  |  |  |  |  |
| OBSERVADO                              |  |  |  |  |  |  |  |
| CLIMA                                  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabla 5.1. Distribuciones de volúmenes de arribos

01, vehículo varado

07, Comercio ambulante

Reducción de Carriles:

02, accidente

08, Pavimento en mal estado

12, Por parqueo

03, Obras

09, Regula agente de tránsito

13, Por pavimento en mal estado

04, Paradero

05, Zona de parqueo

06, Giro prohibido a la Izq

10, Congestión intersección siguiente

11, Congestión intersección anterior

14, Por ventas ambulantes

15: No hay demarcación horizontal

16, Otros

Intersección: Avenida 12 de Noviembre, Gonzáles Suárez, avenida el Rey, avenida las Américas, y calle Juan Cajas.

Tipo de distribuidor de tráfico: Redondel, (conocido como redondel de Cumandá).

Medida: Volumen de tráfico de entrada y salida de vehículos.

Fecha: Jueves 10 de febrero del 2011

Grupo de trabajo: uno

Número de carriles 2

Número de carriles efectivos 2

Ancho efectivo del carril 7m

Intervalo de tiempo de registro de conteo: 15 minutos,

Horario Diario: 6:30 a 9:00 12: 00 14:00 16:00 a 19:00

Clasificación de vehículos por tipo:

A= vehículos livianos 90 %

B= buses 9 %

C= camiones 1 %,

En el formulario se registra: A=146 B=21 C= 4

Vehículo equivalente  $198 = (A + 2B + 2,5C) = (146 + 2(21) + 2,5(4))$

## Intervalo pico

Antes del inicio de los trabajos de campo, la Dirección de Tránsito y Movilidad (DTM) se reunieron con sus técnicos, para establecer el inicio y la terminación de las dos horas de máxima demanda de la mañana, medio día y de la tarde, quedando éstas de la manera siguiente:

6:45 a 8:45 AM, 12:00 a 14:00 y de 16:00 a 19:00 horas,

Los aforos vehiculares en intersecciones se realizaron en un solo día hábil. Se incluyeron todos los accesos de la intersección y los volúmenes de tránsito fueron clasificados en los tres tipos de vehículo: automóvil, autobús y camión. Los recuentos vehiculares fueron ordenados en períodos de 15 minutos.

Valor Máximo Hora Pico 6:30 a 9:00 = 941

Valor Máximo Hora Pico 12:00 a 14:00 = 957

Valor Máximo Hora Pico 16:00 a 19:00 = 981

Como se indicaba anteriormente, también recorridos con el fin de registrar tiempos de viaje a través de las diferentes vías con conflicto de tráfico vehicular dentro del casco urbano de Ambato, planificándose según muestra la tabla siguiente:

| CORREDORES            | DESDE           | HASTA           | SENTIDO   |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Doce de Noviembre     | Gonzalez Suarez | Eugenio Espejo  | N-S Y S-N |
| Pedro Fermín Cevallos | Francisco Flor  | Unidad Nacional | N-S Y S-N |
| Antonio José de Sucre | Quito           | Eugenio Espejo  | S-N       |
| Simón Bolívar         | Unidad Nacional | Francisco Flor  | N-S       |
| Eugenio Espejo        | 12 de Noviembre | Lizardo Ruiz    | E-O       |
| Joaquín Lalama        | Cuenca          | J. B. Vela      | O-E       |
| Luis A. Martínez      | J. B. Vela      | Rocafuerte      | E-O       |
| Juan León Mera        | Bolívar         | J. B. Vela      | O-E       |
| Juan Montalvo         | J. B. Vela      | Lizardo Ruiz    | E-O       |
| Mariano Castillo      | Rocafuerte      | J. B. Vela      | O-E       |

Tabla 5.2. Corredores evaluados con el vehículo flotante  
Fuente: Plan Maestro de Tráfico de la ciudad de Ambato

Se obtuvieron los siguientes datos del comportamiento de los recorridos a través de la avenida 12 de noviembre desde la intersección con la avenida, Gonzales Suárez hasta la intersección con la calle Eugenio Espejo:

Grupo de Trabajo # 1

**Sentido:** Sur - Norte

Fecha del recorrido: febrero del 2011

Datos estadísticos:

Numero de recorridos realizados 3

Tiempo de viaje en el recorrido en el corredor en seg, (Promedio) 418

Tiempo de espera en el corredor en segundos 157

Número de paradas del corredor 4

El método de velocidad de recorrido sirve para la recolección de los datos de tiempos y velocidades de recorrido fue el denominado del “vehículo flotante”. Al respecto, se realizaron mediciones en los corredores viales, del casco central urbano. Esta incluye la

repetición de los recorridos, tres veces en períodos de máxima demanda y tres veces en períodos de “flujo libre”.

Velocidad de recorrido.- es el cociente entre el espacio recorrido y el tiempo de recorrido.

Velocidad de viaje del recorrido km/h 5

Tiempo de marcha.- Es el tiempo que transcurre mientras un vehículo recorre una cierta distancia, no se incluye el tiempo mientras el vehículo está demorado por causas imputables a la vía y/o a la corriente del tránsito, El vehículo esta efectivamente en movimiento.

Velocidad de marcha,- Es el cociente entre el espacio recorrido y el espacio de marcha.

Velocidad de Marcha del corredor km/h. 26

**Sentido:** Norte - Sur

Grupo de Trabajo # 1

Fecha: febrero del 2011

Datos estadísticos:

Numero de recorridos realizados 3

Tiempo de viaje en el recorrido en el corredor en seg, (promedio) 316

Tiempo de espera en el corredor en segundos 93

Número de paradas del corredor 3

Velocidad de viaje del recorrido km/h 8

Por medio de recorridos adicionales, durante las horas de máxima demanda global en la red de estudio, se trataron de identificar condiciones especiales de operación en los enlaces y nodos de la misma, entre las que se encuentran las siguientes:

Enlaces con una elevada demanda de estacionamiento.

Enlaces con restricciones en el estacionamiento.

Enlaces y nodos en que se presenten problemas ocasionados por peatones y/o bicicletas.

## **B.- Descripción de los enlaces**

$Y_1$  es el número de vehículos que circulan en la calle Espejo en dirección norte, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre hasta la intersección de la Juan Benigno Vela.

$Y_2$  es el número de vehículos que circulan en la calle Espejo en dirección sur, desde la intersección calle Juan Benigno Vela hasta la intersección de la avenida 12 de Noviembre.

$Y_3$  es el número de vehículos que circulan en la calle Espejo, en dirección norte, desde la intersección de la calle Juan Benigno Vela, hasta la avenida Cevallos.

$Y_4$  es el número de vehículos que circulan en la avenida Cevallos, en dirección este, desde la intersección de la calle espejo hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$Y_5$  es el número de vehículos que circulan en la avenida Cevallos, en dirección oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla, hasta la calle Eloy Alfaro.

$Y_6$  es el número de vehículos que circulan en la avenida Cevallos en dirección oeste, desde la intersección de la calle Eloy Alfaro, hasta la intersección de la calle Espejo.

$Y_7$  es el número de vehículos que circulan en la avenida 12 de Noviembre, en dirección este, desde la intersección de la calle espejo hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$Y_8$  es el número de vehículos que circulan en la avenida 12 de Noviembre en dirección oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo.

$Y_9$  es el número de vehículos que circulan en la calle Tomas Sevilla, en sentido norte, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre hasta la intersección de la calle Juan Benigno Vela.

$Y_{10}$  es el número de vehículos que circulan en la calle Juan Benigno Vela dirección oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo.

$Y_{11}$  es el número de vehículos que circulan en la calle Tomas Sevilla, en dirección norte, desde la intersección de la calle Juan Benigno Vela, hasta la avenida Cevallos.

### **C.- Descripción de las rutas**

$X_1$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección norte, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre hasta la calle Juan Benigno Vela.

$X_2$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección norte, desde la avenida 12 de Noviembre hasta la avenida Cevallos, a los cuales se incrementa los vehículos de la intersección calle Juan Benigno Vela.

$X_3$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección norte, desde la avenida 12 de Noviembre hasta la avenida Cevallos, a los cuales se incrementa los de la intersección de la calle Juan Benigno Vela, además de la intersección de la Tomas Sevilla y 12 de Noviembre, se suma también los flujos de vehículos de la avenida Cevallos.

$X_4$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección norte, desde la avenida 12 de Noviembre hasta la avenida Cevallos, a los cuales se incrementa los de la intersección de la calle Juan Benigno Vela, además de la intersección de la calle Tomas Sevilla y 12 de Noviembre.

$X_5$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la avenida 12 de noviembre en dirección este, hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla, seguidamente toma la calle Tomas Sevilla en dirección norte hasta la calle Juan Benigno Vela.

$X_6$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la avenida 12 de Noviembre en dirección este, hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$X_7$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección sur, desde la intersección de la calle Juan Benigno Vela, hasta la avenida 12 de Noviembre.

$X_8$  es el resultado de la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Espejo en dirección norte, desde la intersección de la calle Juan Benigno Vela, hasta la avenida Cevallos.

$X_9$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan, en la calle Espejo en dirección sur, para continuar en la avenida 12 de Noviembre en dirección oeste hasta llegar a la intersección de la calle Tomas Sevilla y viajar en dirección norte hasta la intersección con la avenida Cevallos, para continuar en dirección este, hasta llegar en la intersección de la calle Eloy Alfaro.

$X_{10}$  es la cantidad de vehículos óptimo que viajan en la calle Espejo en sentido norte hasta llegar a la intersección de la avenida Cevallos, para continuar en sentido este hasta llegar a la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$X_{11}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan, en la calle Espejo en dirección sur, para continuar en la avenida 12 de Noviembre en dirección oeste hasta llegar a la intersección de la calle Tomas Sevilla y viajar en dirección norte hasta la intersección con la calle Juan Benigno Vela.

$X_{12}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan, en la calle Espejo en dirección sur, para continuar en la avenida 12 de Noviembre en dirección oeste hasta llegar a la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$X_{13}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan, en la avenida Cevallos desde la intersección de la calle Espejo, hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$X_{14}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la avenida Cevallos, desde la intersección de la calle Eloy Alfaro hasta la intersección de la calle Espejo.

$X_{15}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la avenida Cevallos, en sentido oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo.

$X_{16}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la avenida Cevallos, en sentido oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Eloy Alfaro.

$X_{17}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Juan Benigno Vela en sentido oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo, luego toma el sentido sur en la calle Espejo hasta la intersección de la avenida 12 de Noviembre.

$X_{18}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Juan Benigno Vela en sentido oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo.

$X_{19}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Juan Benigno Vela en sentido oeste, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo, luego toma el sentido norte en la calle espejo hasta la intersección de la avenida Cevallos.

$X_{20}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido norte en la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la avenida Cevallos, para tomar en esta el sentido oeste, hasta la intersección de la calle Eloy Alfaro.

$X_{21}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido norte en la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la avenida Cevallos.

$X_{22}$  es la cantidad óptima de vehículos que viajan en la calle Juan Benigno Vela en sentido oeste desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle

Espejo, continuando en esta en dirección sur hasta llegar a la intersección de la avenida 12 de Noviembre, continuando en dirección este, hasta la intersección de la calle Tomas Sevilla.

$X_{23}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido oeste que viajan en la avenida 12 de Noviembre, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo.

$X_{24}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido oeste que viajan en la avenida 12 de Noviembre, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo, y por esta en sentido norte hasta la intersección de la calle Juan Benigno Vela.

$X_{25}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido oeste que viajan en la avenida 12 de Noviembre, desde la intersección de la calle Tomas Sevilla hasta la intersección de la calle Espejo, y por esta en sentido norte hasta la intersección de la calle Juan Benigno Vela, continuando con el sentido norte hasta llegar a la intersección de la avenida Cevallos.

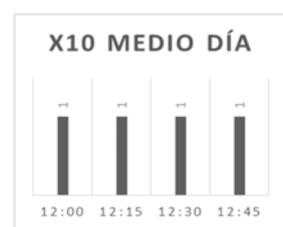
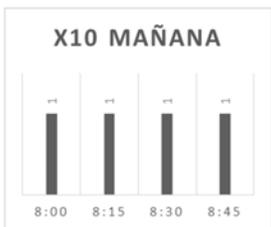
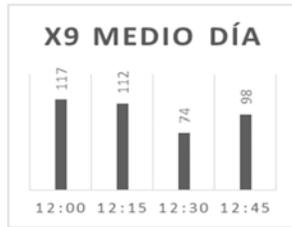
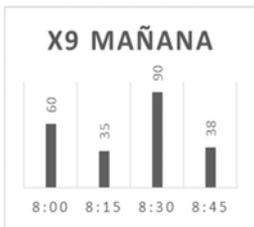
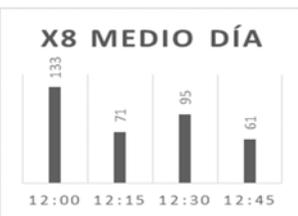
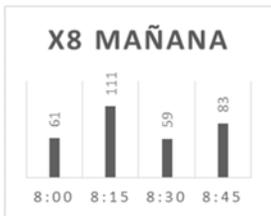
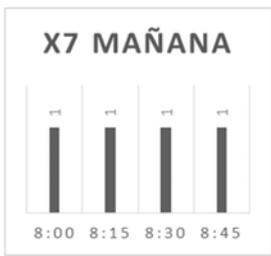
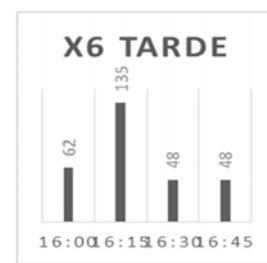
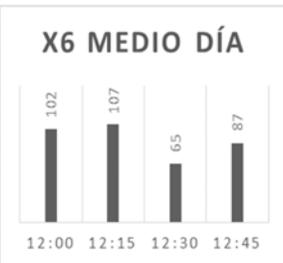
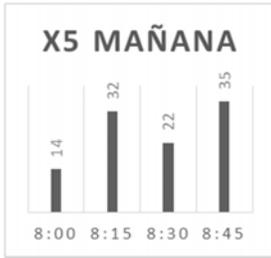
$X_{26}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido norte, que viajan en la calle Tomas Sevilla, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre, hasta la intersección con la avenida Cevallos, tomando esta en sentido oeste hasta la intersección de la calle Eloy Alfaro.

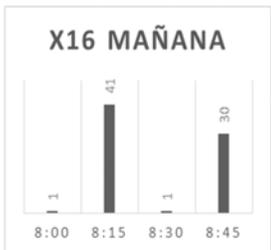
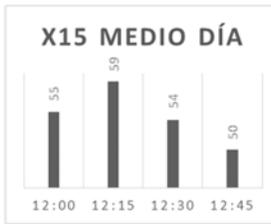
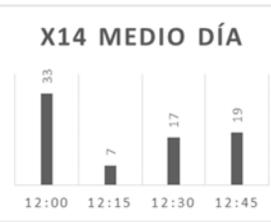
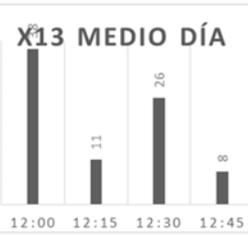
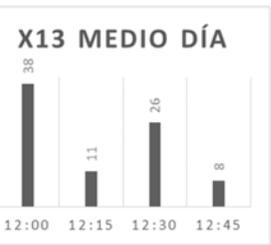
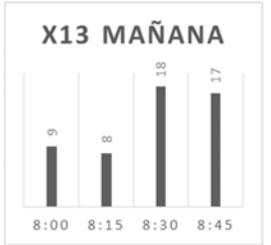
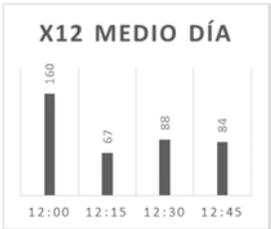
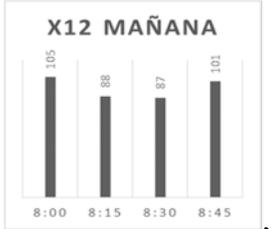
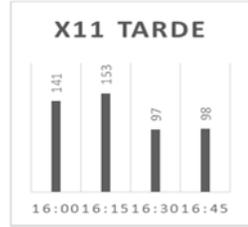
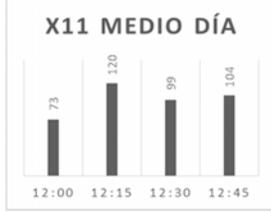
$X_{27}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido norte, que viajan en la calle Tomas Sevilla, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre, hasta la intersección con la avenida Cevallos.

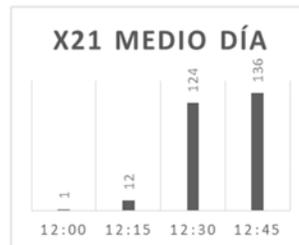
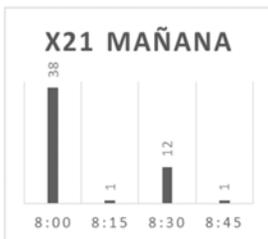
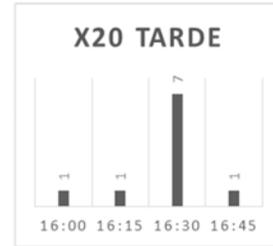
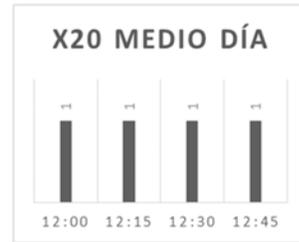
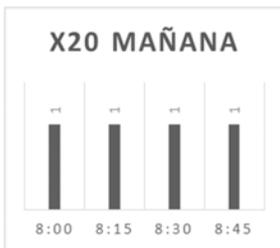
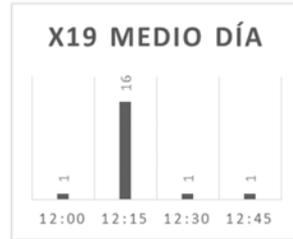
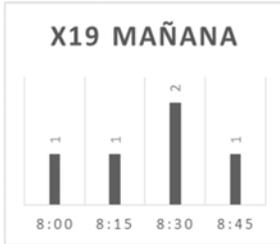
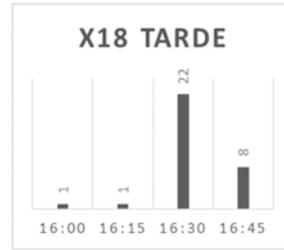
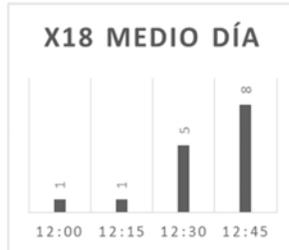
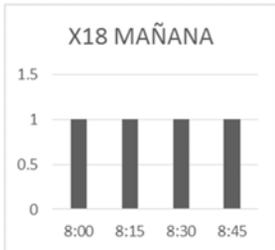
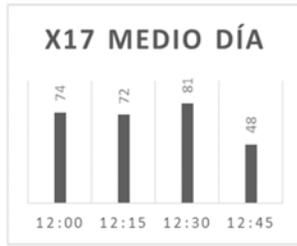
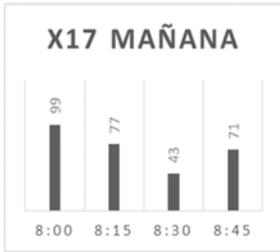
$X_{28}$  es la cantidad óptima de vehículos en sentido norte, que viajan en la calle Tomas Sevilla, desde la intersección de la avenida 12 de Noviembre, hasta la intersección de la calle Juan Benigno Vela.

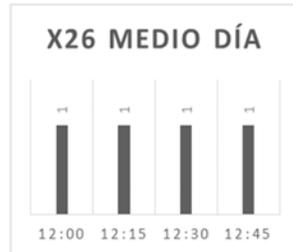
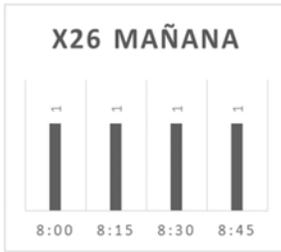
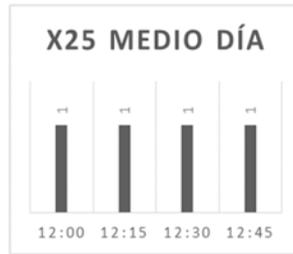
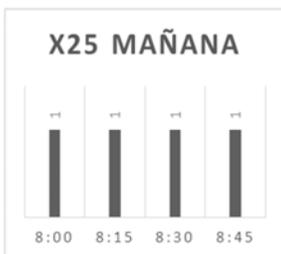
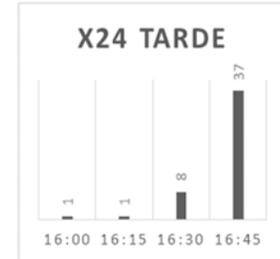
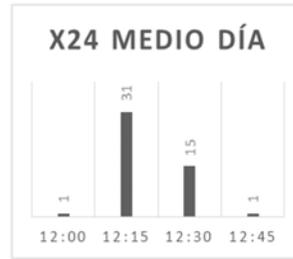
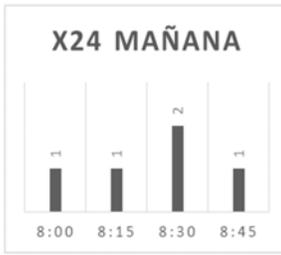
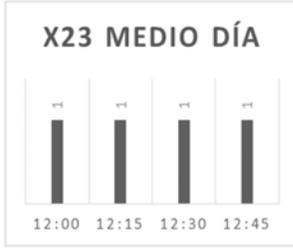
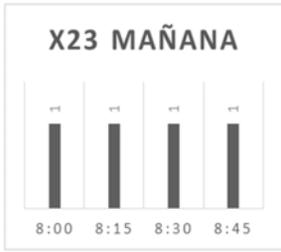
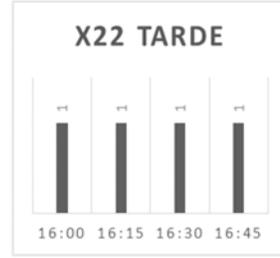
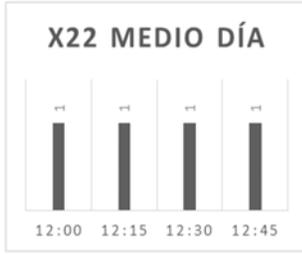
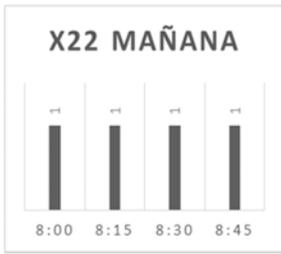
### D.- Gráficas evolución de flujos de tráfico











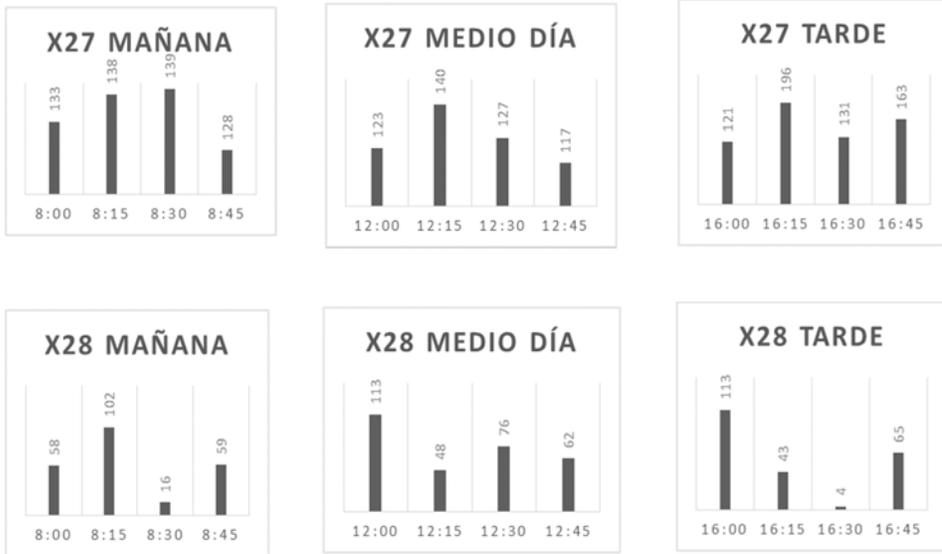
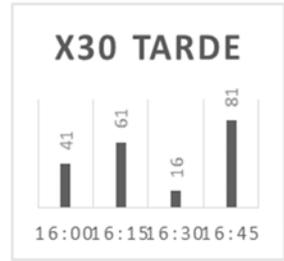
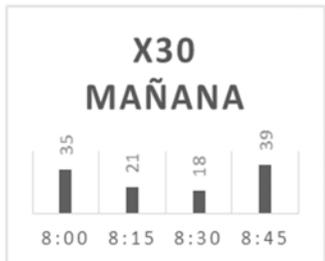
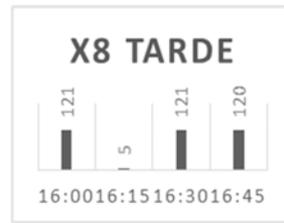
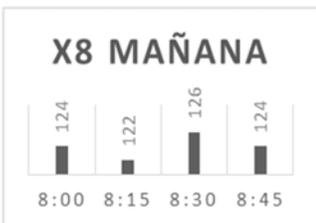
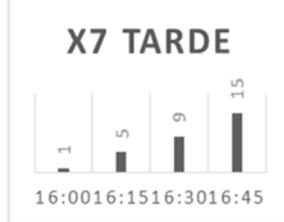
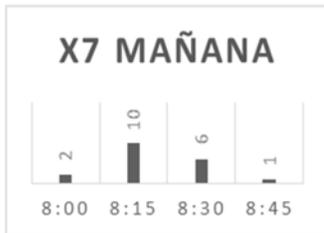
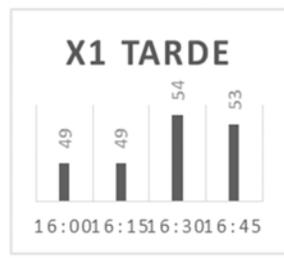
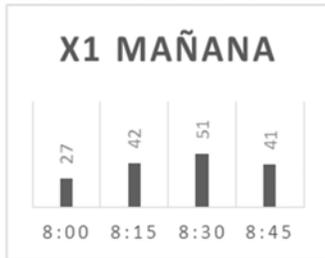
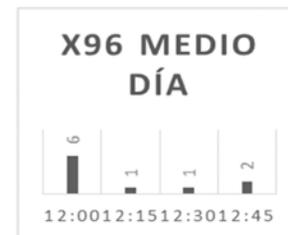
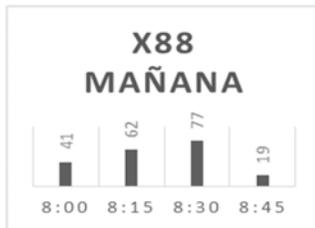
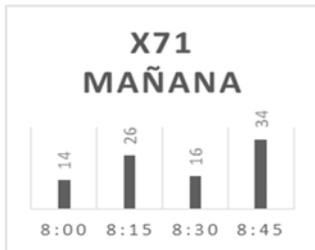
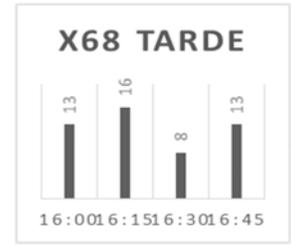
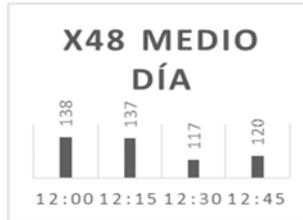
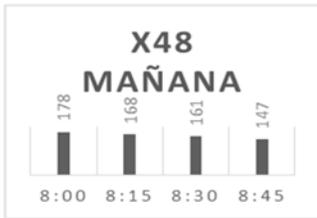
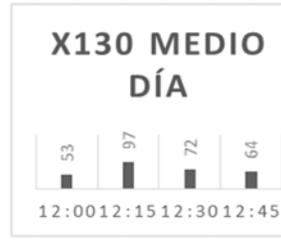
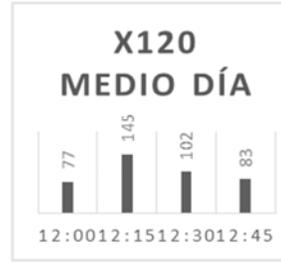
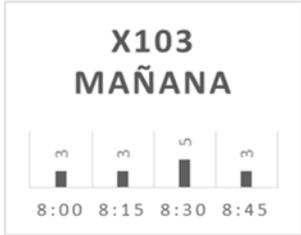
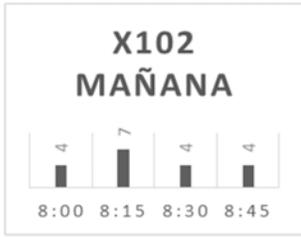


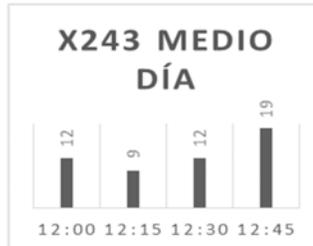
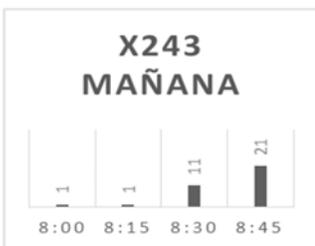
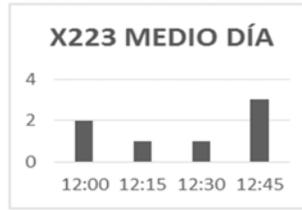
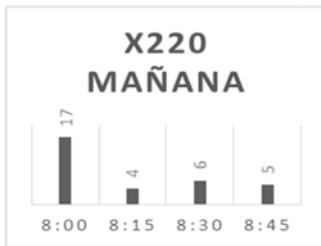
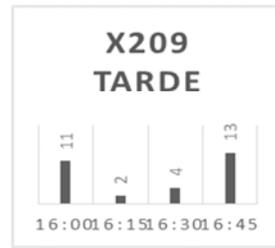
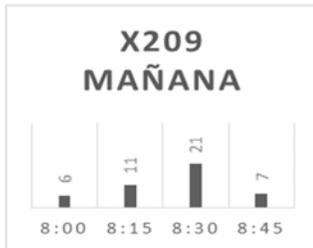
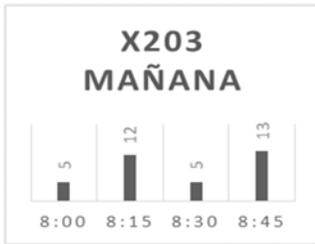
Figura 4.5. Volúmenes de vehículos en X calculados, en la tabla 3,12

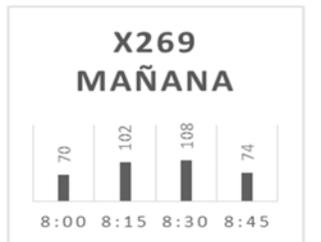
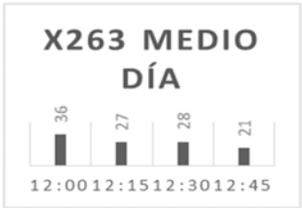
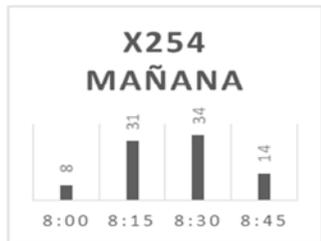
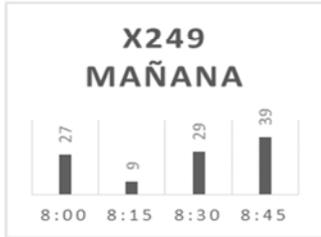
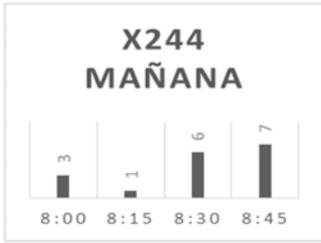
Gráficos de volúmenes de tráfico en los tres horarios mañana medio día y tarde del ejercicio del casco urbano de la ciudad de Ambato.











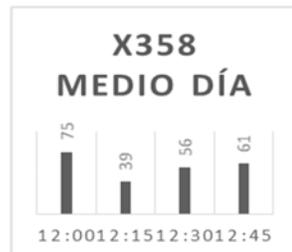
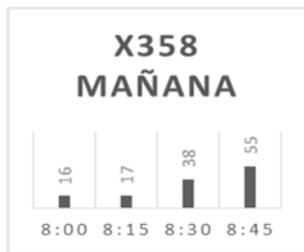
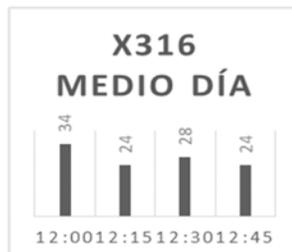
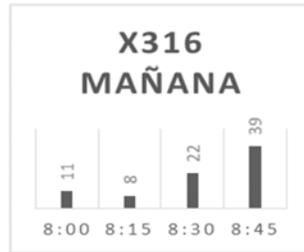
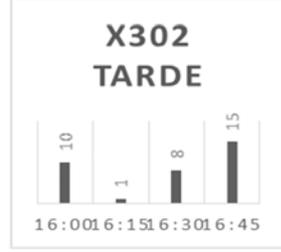
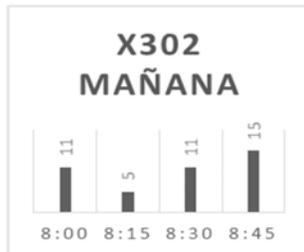
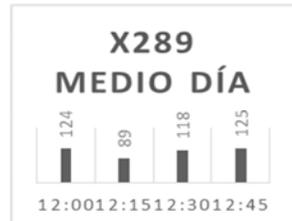
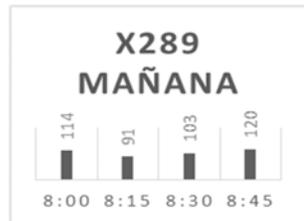
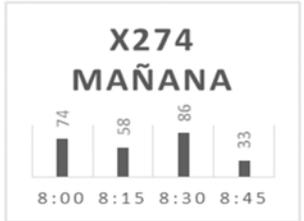




Figura 4.6. Volúmenes de vehículos en X calculados, en la tabla 3,12

## Anexo 2

### A.- Flujo de enlaces en horas punta

| ENLACES |       | FLUJO DE DATOS EN HORAS PUNTA |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |       | 8:00                          | 8:15 | 8:30 | 8:45 | 12:00 | 12:15 | 12:30 | 12:45 | 16:00 | 16:15 | 16:30 | 16:45 |
| Y12     | 60-53 | 196                           | 186  | 182  | 170  | 159   | 160   | 160   | 142   | 185   | 182   | 143   | 144   |
| Y13     | 53-60 | 306                           | 292  | 318  | 334  | 232   | 282   | 280   | 250   | 336   | 285   | 253   | 324   |
| Y14     | 53-44 | 150                           | 140  | 157  | 147  | 150   | 162   | 152   | 152   | 134   | 138   | 140   | 142   |
| Y15     | 44-59 | 191                           | 172  | 191  | 186  | 110   | 162   | 150   | 146   | 150   | 196   | 169   | 188   |
| Y16     | 44-43 | 43                            | 46   | 48   | 48   | 61    | 54    | 57    | 55    | 52    | 50    | 44    | 52    |
| Y17     | 52-53 | 166                           | 150  | 160  | 185  | 154   | 150   | 160   | 134   | 232   | 212   | 103   | 172   |
| Y18     | 45-43 | 110                           | 100  | 127  | 95   | 135   | 133   | 117   | 125   | 120   | 138   | 145   | 167   |
| Y19     | 43-45 | 135                           | 190  | 193  | 127  | 149   | 209   | 183   | 156   | 172   | 170   | 137   | 180   |
| Y20     | 52-45 | 135                           | 122  | 160  | 120  | 172   | 116   | 146   | 156   | 152   | 170   | 180   | 208   |
| Y21     | 45-52 | 122                           | 171  | 174  | 115  | 134   | 188   | 164   | 141   | 155   | 153   | 124   | 162   |
| Y22     | 59-52 | 214                           | 192  | 249  | 182  | 268   | 260   | 224   | 243   | 232   | 270   | 284   | 330   |
| Y23     | 52-59 | 89                            | 118  | 123  | 87   | 194   | 134   | 121   | 105   | 182   | 110   | 95    | 118   |
| Y24     | 58-59 | 39                            | 38   | 41   | 46   | 78    | 94    | 84    | 89    | 63    | 68    | 79    | 90    |
| Y25     | 51-52 | 80                            | 76   | 95   | 92   | 110   | 108   | 110   | 102   | 106   | 92    | 104   | 104   |
| Y26     | 45-46 | 39                            | 44   | 52   | 38   | 68    | 54    | 47    | 48    | 60    | 52    | 49    | 58    |
| Y27     | 42-43 | 46                            | 44   | 41   | 43   | 70    | 78    | 84    | 80    | 52    | 60    | 59    | 67    |
| Y28     | 42-46 | 44                            | 56   | 46   | 70   | 57    | 90    | 110   | 116   | 99    | 72    | 108   | 88    |
| Y29     | 46-51 | 54                            | 26   | 59   | 76   | 74    | 100   | 113   | 118   | 110   | 82    | 114   | 98    |
| Y30     | 51-58 | 45                            | 26   | 49   | 60   | 61    | 80    | 88    | 90    | 85    | 64    | 88    | 78    |
| Y31     | 57-58 | 30                            | 43   | 44   | 34   | 96    | 108   | 90    | 88    | 74    | 90    | 86    | 160   |
| Y32     | 50-51 | 71                            | 76   | 85   | 76   | 98    | 84    | 88    | 75    | 74    | 78    | 78    | 84    |
| Y33     | 46-47 | 34                            | 22   | 27   | 24   | 34    | 42    | 37    | 45    | 32    | 34    | 28    | 40    |
| Y34     | 41-42 | 36                            | 48   | 56   | 47   | 78    | 86    | 99    | 121   | 54    | 71    | 74    | 72    |
| Y35     | 47-41 | 62                            | 56   | 57   | 51   | 51    | 68    | 60    | 68    | 68    | 66    | 64    | 74    |
| Y36     | 50-47 | 69                            | 64   | 64   | 58   | 55    | 74    | 68    | 75    | 78    | 73    | 74    | 82    |
| Y37     | 55-50 | 70                            | 71   | 90   | 102  | 118   | 106   | 103   | 112   | 111   | 120   | 124   | 129   |
| Y38     | 57-55 | 88                            | 87   | 112  | 127  | 149   | 132   | 128   | 140   | 138   | 150   | 156   | 161   |
| Y39     | 56-57 | 76                            | 78   | 78   | 75   | 74    | 73    | 67    | 74    | 88    | 73    | 94    | 90    |
| Y40     | 49-50 | 70                            | 76   | 84   | 74   | 96    | 82    | 84    | 71    | 77    | 69    | 73    | 78    |
| Y41     | 47-48 | 41                            | 30   | 34   | 31   | 38    | 48    | 44    | 52    | 42    | 40    | 38    | 48    |
| Y42     | 40-41 | 32                            | 47   | 56   | 46   | 82    | 88    | 103   | 125   | 54    | 72    | 74    | 71    |
| Y43     | 40-48 | 158                           | 144  | 177  | 151  | 133   | 142   | 134   | 124   | 141   | 147   | 142   | 154   |
| Y44     | 48-49 | 146                           | 133  | 163  | 139  | 124   | 132   | 124   | 118   | 132   | 138   | 132   | 146   |
| Y45     | 49-54 | 138                           | 127  | 154  | 133  | 121   | 126   | 120   | 114   | 126   | 131   | 126   | 140   |
| Y46     | 54-56 | 112                           | 104  | 126  | 110  | 100   | 104   | 98    | 94    | 104   | 108   | 104   | 114   |
| Y47     | 55-54 | 18                            | 16   | 22   | 26   | 30    | 26    | 25    | 28    | 27    | 30    | 32    | 32    |

Tabla 5.3. Datos de enlace para la red del Mercado Modelo con 21 nodos