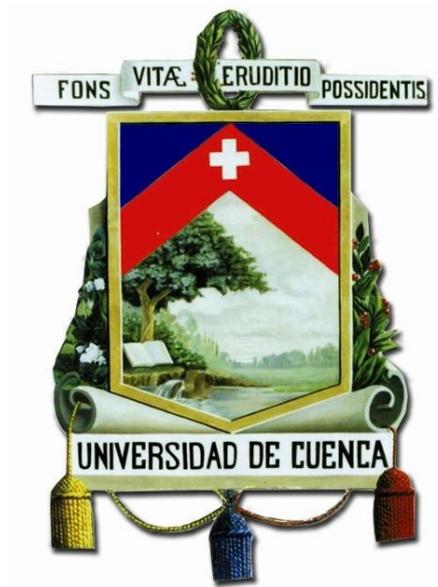


UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

“Evaluación de acciones encaminadas a la aplicación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca en el Centro Histórico, mediante un modelo calibrado de movilidad vehicular”.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Luis Martín López Molina. C.I: 0105750400

Miguel Fernando Vásquez Granda. C.I: 0105519771

Director:

Ing. Juan Marcelo Avilés Ordóñez. MSc

C.I: 0103872503

Cuenca, Ecuador

2017



RESUMEN

El Gobierno Autónomo Descentralizado de Cuenca diseñó el Plan de Movilidad y Espacios Públicos (PMEP) como soporte de una nueva movilidad. El Centro Histórico, representa la cuarta parte de la movilidad local, por lo que se proponen múltiples cambios para un nuevo sistema viario en este sector. En este contexto, este trabajo plantea evaluar las acciones del GAD encaminadas a la aplicación del PMEP en el Centro Histórico de Cuenca, planteando un modelo de su movilidad vehicular. Dicha evaluación se enfoca en la jerarquización de vías en función de velocidades límite de circulación. El modelo fue construido y calibrado para el año 2015, en función de información estática y dinámica recolectada, y proyectado para el año 2018. Se obtuvieron un R^2 de 0.98 y una bondad de ajuste (GEH) de 0.90, que garantizan la correcta calibración del modelo. Además, se determinó que para el año 2018 tras los cambios propuestos en el PMEP, aumentará el porcentaje de vías con niveles de servicio E y F, dado que el flujo que disminuye en ciertas vías, se traslada a otras aledañas y las colapsa. En consecuencia, se observó que existe una redistribución en la dinámica de circulación vehicular en el Centro Histórico en el 2018. Además, gran cantidad de vehículos se quedan sin ingresar al Centro Histórico. Por ende, se recomienda que conjuntamente con la implementación de acciones del PMEP se tomen medidas para promover nuevas rutas, parqueos y modos de transporte público seguro.

Palabras clave: Centro Histórico, PMEP, modelo microscópico, movilidad vehicular, calibración, velocidad, nivel de servicio.



ABSTRACT

The Gobierno Autónomo Descentralizado de Cuenca designed the Plan de Movilidad y Espacios Públicos (PMEP) as support for a new vehicular mobility. The Historic Center represents a quarter of the local vehicular mobility, for this reason many changes are suggested for a new road system. In this context, this document suggests the evaluation of the actions taken by the GAD on the application of the PMEP at the Historic Center of Cuenca, proposing a model of its vehicular mobility. We have focused the evaluation on the ranking of the speed limits. The model was built and calibrated for the year 2015, taking in consideration static and dynamic information collected and it's projected for the year 2018. We obtained an R^2 of 0.98 and a goodness of fit (GEH) of 0.90, which ensures the correct calibration of the model. Also it was determined that by the year 2018, after applying the mentioned changes on the PMEP, the percentage of roads with level E and F of service will increase, where the flow of traffic decreases in some roads, but it moves to parallel roads, this causes them to collapse. Therefore we have seen that there exists a rearrangement in the dynamic of traffic circulation at the Historic Center in 2018. A great deal of vehicles don't get access to the Historic Center. Therefore we recommended that along with the execution of the actions by the PMEP, measures must be taken to promote new routes, parking spots and secure ways of transportation.

Key words: Historic Center, PMEP, microscopic model, vehicular mobility, calibration, speed, service level.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CONTENIDO	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes	17
1.2 Alcance	17
1.3 Justificación.....	18
1.4 Objetivos	18
1.4.1 General	18
1.4.2 Específicos.....	19
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1 Características del tránsito	20
2.1.1 Volumen de tránsito	20
2.1.2 Velocidad	21
2.1.3 Densidad.....	23
2.2 Dispositivos de control de tránsito	23
2.2.1 Clasificación	24
2.3 Intersecciones	24
2.4 Capacidad vial.....	25
2.5 Niveles de servicio	26
2.5.1 Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas.....	27
2.6 Semaforización	28
2.6.1 Clasificación	29
2.6.2 Terminología básica.....	30
2.6.3 Cálculo de los tiempos de un semáforo	31
2.7 Simulación de tráfico.....	31
2.7.1 Generalidades de modelación	31
2.7.2 Proceso de simulación de tráfico.....	32
2.7.2.1 Ámbito de estudio	33
2.7.2.2 Recolección de datos	33



2.7.2.3 Construcción del modelo de simulación.....	33
2.7.2.4 Verificación del modelo.....	33
2.7.2.5 Calibración del modelo	33
2.7.2.6 Validación del modelo.....	34
2.7.2.7 Análisis de alternativas	34
2.8 Plataformas de simulación.....	35
2.9 Acciones del Plan de Movilidad y Espacios Públicos	35
2.9.1 Acciones a ser evaluadas.....	36
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1 Micro simulación de tráfico	38
3.1.1 Ámbito de estudio	38
3.1.2 Recolección de datos.....	39
3.1.2.1 Estática	39
3.1.2.2 Dinámica	40
3.1.3 Construcción del modelo de simulación	40
3.1.3.1 Creación de la red	40
3.1.3.2 Determinación de la Hora de Máxima Demanda (HMD).....	41
3.1.3.3 Agenda semafórica.....	41
3.1.3.4 Demanda de tráfico	42
3.1.3.5 Consideraciones e hipótesis para el desarrollo del modelo.....	45
3.1.4 Verificación del modelo.....	45
3.1.5 Calibración del modelo	45
3.1.6 Análisis de alternativas	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	49
4.1 Demanda de tráfico.....	49
4.2 Modelo de micro simulación calibrado	50
4.3 Análisis de escenarios	54
4.3.1 Análisis de micro zonas	55
4.3.1.1 Capacidad.....	56
4.3.1.2 Velocidad de operación	56
4.3.1.3 Nivel de servicio y tiempo de demora	59
4.3.1.4 Flujo	63
4.3.2 Análisis de la zona de estudio completa	65
4.3.2.1 Nivel de servicio.....	65
4.3.2.2 Parámetros temporales	67
4.3.2.3 Efecto del tranvía sobre el tráfico de la zona	68



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Recomendaciones	70
REFERENCIAS	72
ANEXOS	74
ANEXO 3.1: Intersecciones localizadas en el área de estudio	75
ANEXO 3.2: Velocidades de circulación en el área de estudio para el año 2015	77
ANEXO 3.3: Transporte público en el Centro Histórico	79
ANEXO 3.4: Localización de parqueaderos en el Centro Histórico	82
ANEXO 3.5: Categorización de intersecciones en el área de estudio.....	84
ANEXO 3.6: Detectores empleados para la calibración del modelo.....	86
ANEXO 3.7: Cambios realizados en el viario del Centro Histórico tras la implementación del PMP	88
ANEXO 4.1: Parámetros de tráfico de las vías del Centro Histórico (N-S).....	90
ANEXO 4.2: Parámetros de tráfico de las vías del Centro Histórico (O-E)	95
ANEXO 4.3: Capacidad en las vías del Centro Histórico.....	100
a. Escenario 1	101
b. Escenario 2.....	102
c. Escenario 3.....	103
ANEXO 4.4: Nivel de servicio en las vías del Centro Histórico.....	104
a. Escenario 1	105
b. Escenario 2.....	106
c. Escenario 3.....	107



ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Clasificación de intersecciones en función de distintas tipologías	24
2.2	Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas	27
3.1	Tiempos semafóricos en los corredores que componen la red	42
3.2	Tiempos semafóricos: calle Larga y Bajada de Todos Santos	42
3.3	Zonas componentes de la matriz “y”	44
3.4	Clasificación parqueaderos públicos.....	46
4.1	Parámetros estadísticos de la muestra obtenida	50
4.2	Matriz O-D (2015) para construcción del modelo	51
4.3	GEH obtenido en los detectores implementados en el área de estudio	53
4.4	Velocidad simulada en vías de la micro zona 1	58
4.5	Velocidad simulada en vías de la micro zona 2	58
4.6	Tiempo de demora en vías de la micro zona 1	60
4.7	Tiempo de demora en vías de la micro zona 2	60
4.8	Flujo en vías de la micro zona 1	64
4.9	Flujo en vías de la micro zona 2	64
4.10	Parámetros temporales en los escenarios planteados.....	68



ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Diagrama de flujo del proceso de micro simulación	32
2.2.	Jerarquización vial del Centro Histórico	37
	a. Primera parte	37
	b. Segunda parte.....	37
3.1	Esquemmatización del área de estudio	39
4.1	Gráfica de regresión del flujo real vs flujo simulado	52
4.2	Gráfica de línea del flujo real vs flujo simulado	52
4.3	Simulación 2D con el software Aimsun 8.1	53
4.4	Simulación 3D con el software Aimsun 8.1	53
4.5	Delimitación de la micro zona 1 para análisis	55
4.6	Delimitación de la micro zona 2 para análisis	55
4.7	Capacidad en vías de las micro zonas.....	57
4.8	Niveles de servicio en vías de las micro zonas	62
4.9	Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 1).....	66
4.10	Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 2).....	66
4.11	Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 3).....	67



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo Luis Martín López Molina, autor del trabajo de titulación "Evaluación de acciones encaminadas a la aplicación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca en el Centro Histórico, mediante un modelo calibrado de movilidad vehicular", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2017

Luis Martín López Molina

C.I: 0105750400



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo Miguel Fernando Vásquez Granda, autor del trabajo de titulación "Evaluación de acciones encaminadas a la aplicación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca en el Centro Histórico, mediante un modelo calibrado de movilidad vehicular", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2017

Miguel Fernando Vásquez Granda

C.I: 0105519771



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo Luis Martín López Molina en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de acciones encaminadas a la aplicación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca en el Centro Histórico, mediante un modelo calibrado de movilidad vehicular", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre del 2017

Luis Martín López Molina

C.I: 0105750400



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo Miguel Fernando Vásquez Granda en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Evaluación de acciones encaminadas a la aplicación del Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca en el Centro Histórico, mediante un modelo calibrado de movilidad vehicular”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre del 2017

Miguel Fernando Vásquez Granda

C.I: 0105519771



“Con orden y tiempo se encuentra el secreto de hacerlo todo, y de hacerlo bien”

-Pitágoras.



AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros sinceros y profundos agradecimientos a la Universidad de Cuenca, quien nos acogió para formarnos ética y profesionalmente, a fin de alcanzar el éxito y un real compromiso con mejorar la sociedad.

A todos los docentes que contribuyeron en nuestra formación, de manera especial al Ing. Juan Avilés Ordoñez por dirigir el presente trabajo de titulación, por su paciencia y apoyo científico e intelectual.

A la Secretaría de Movilidad del Municipio de Cuenca, de manera especial a la Ing. Carolina Ormaza, por brindarnos su colaboración en la obtención de información para el correcto desarrollo y culminación de este trabajo de titulación.

¡GRACIAS!

*Luis Martín López Molina
Miguel Fernando Vásquez Granda*



DEDICATORIA

A Dios:

Por darme salud y fuerza para enfrentar las adversidades y culminar esta etapa profesional.

A mis padres:

Luis y María, que representan el pilar fundamental de mi vida, quienes con sus enseñanzas, afecto e incondicional apoyo me han ayudado siempre a salir adelante y ser una persona responsable y comprometida.

A mis hermanos:

Joaquín y Sebastián, por permitirme ser una guía para ellos, y alegrar mis días con sus locuras y ocurrencias.

A mis ángeles:

Abuelo Pachi y primo Tito, que me cuidan desde el cielo, los tengo presentes en cada una de mis acciones y viven eternamente en mi corazón.

A mi demás familia:

Abuelos, primos y tíos que constantemente me muestran su apoyo y confianza.

A mis amigos:

Con quienes compartimos gratos momentos y largas noches de estudio.

Luis Martín López Molina



DEDICATORIA

A Dios y la Virgen:

Por haberme brindado salud y fuerzas en el transcurso de este camino.

A mi familia:

Especialmente a mis padres que son mi motivación, orgullo y el mejor regalo que la vida me pudo dar.

Miguel Fernando Vásquez Granda



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En una singular apuesta de planificación y gestión urbana hacia una ciudad sostenible, el Gobierno Autónomo Descentralizado de Cuenca (GAD) diseña el Plan de Movilidad y Espacios Públicos (PMEP) como soporte de una nueva movilidad, priorizando las demandas de transporte, condicionadas por las diferentes actividades para el desarrollo del ser humano. Además, busca mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, ofreciendo sistemas de transporte eficiente y garantizando un crecimiento económico. Así como lograr una regeneración urbana, recuperando la esencia propia del espacio público y las dinámicas de circulación y convivencia que en éste se desarrollaban históricamente [1].

El Centro Histórico, sector altamente comercial con gran valor histórico y patrimonial, representa la cuarta parte de la movilidad local con 177.095 de 685.080 viajes de destino que se realizan en la ciudad. Actualmente, datos de encuestas complementados con resultados de estudios de origen-destino definen parámetros de comportamiento del tráfico en la zona [2], [3].

Sin embargo, se necesita un modelo que determine el funcionamiento y dinámica de circulación vehicular en el sector. Dentro de este contexto, este trabajo plantea un modelo de micro simulación de tráfico, que establece la movilidad vehicular y permite determinar demandas y demoras. Dicho modelo es construido y calibrado para el año 2015, en función de información estática y dinámica recolectada, y proyectado para el año 2018. Además, en función de los resultados de la simulación se podrá evaluar las acciones propuestas por el GAD, encaminadas a la aplicación del PMEP en el Centro Histórico.

Dicha evaluación se enfoca en aplicar los cambios propuestos para obtener un nuevo sistema viario en este sector, jerarquizando las vías en función de velocidades límite de circulación. El impacto que éstas generen sobre la capacidad y niveles de servicio, incidirá directamente en la dinámica de circulación vehicular del Centro Histórico.

El área urbana de estudio comprende el centro Histórico de Cuenca, cuyos límites son la calle Gaspar Sangurima al norte, la calle Larga al sur, al este la avenida Huayna Cápac y al oeste la calle Octavio Cordero.



1.1 Antecedentes

La movilidad es parte fundamental en la dinámica de una ciudad, sin embargo, se halla condicionada por la estructura urbana existente y las necesidades de la ciudadanía, generadas a partir de las diferentes actividades inherentes al desarrollo del ser humano. La ciudad de Cuenca a lo largo de su proceso de consolidación, concentró una importante cantidad de actividades de distinto carácter en su centro urbano, conocido actualmente como Centro Histórico, mismas que lo han constituido como una de las zonas más concurridas a escala de ciudad y territorio.

La planificación urbana desde la segunda mitad del siglo XX, priorizó la presencia del vehículo automotor con planes de ordenamiento que propusieran el ensanchamiento de vías, favoreciendo el acceso a áreas frecuentadas con mayor intensidad, como el Centro Histórico. La aplicación de dichos planes provocó la alteración del contexto urbano y arquitectónico, a más de generar cierta marginalidad para el resto de los modos de transporte [4].

Por otro lado, en los comienzos del siglo XXI, las vías en el Centro Histórico se encuentran congestionadas y no permiten lograr una vinculación entre los espacios públicos existentes en esta área [5]. Dentro de este contexto, el Plan de Movilidad y Espacios Públicos, consciente del especial cuidado que requiere el área central y su funcionamiento actual, busca recuperar la esencia propia del espacio público y las dinámicas de comunicación y convivencia que en este se desarrollaban históricamente. Para ello, el PMEP pretende generar una conectividad, mediante la integración de distintos modos de transporte no motorizado y vías con espacios singulares articuladores de relaciones sociales, entre otras, que constituyen puntos de encuentro y determinan la estructura funcional urbana.

1.2 Alcance

En el presente trabajo técnico se evalúan las acciones encaminadas a la aplicación del PMEP en el Centro Histórico de Cuenca [4], limitado por las calles Gaspar Sangurima al norte, calle Larga al sur, Av. Huayna Cápac al este y calle Octavio Cordero al oeste. Para determinar la dinámica de circulación en el sector, se elaborará un modelo de micro simulación de tráfico para el año 2015 con el software AIMSUN 8.1. Dicho modelo es calibrado en base a datos de aforos existentes, y proyectado para el año 2018. Además, para su construcción se obtendrá información estática y dinámica que establece la movilidad vehicular en el sector y permitirá



determinar demandas y demoras. En función de los resultados del modelo de simulación se estimará el comportamiento del sistema de tráfico ante los cambios propuestos por el PMEPE [4], principalmente la jerarquización de vías en función de velocidades límite, permitiendo evaluar los niveles de servicio de las vías que componen dicho sistema [6].

1.3 Justificación

El modelo a aplicarse en el Centro Histórico de Cuenca, propuesto por el GAD Municipal en el PMEPE, busca ser funcionalmente equilibrado, autosustentable y sostenible, potencializando el concepto de espacio habitable y recuperación del espacio público. Sin embargo, la aplicación de dicho modelo viene ligada a ciertos cambios físicos, funcionales y estructurales en las vías existentes en el Centro Histórico. Por ende, es necesario conocer su impacto sobre la movilidad vehicular y los distintos parámetros que definen el comportamiento del tráfico en la zona.

Dentro de este contexto, con este trabajo de titulación se busca generar un modelo calibrado de movilidad vehicular del Centro Histórico a fin de recrear el comportamiento existente en la zona y analizar distintos escenarios inherentes a las acciones propuestas por el PMEPE [1], principalmente la jerarquización de las vías en función de velocidades límites de circulación.

Dicho análisis permitirá establecer la capacidad y niveles de servicio en las vías del Centro Histórico y evaluar si dichas acciones garantizan una movilidad sostenible, que satisfagan las demandas de transporte inherentes a actividades antrópicas y cumplan con los objetivos planteados por el GAD Municipal.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Evaluar las acciones del Gobierno Autónomo Descentralizado encaminadas a la aplicación del PMEPE en el Centro Histórico de Cuenca, planteando un modelo microscópico calibrado de su movilidad vehicular.



1.4.2 Específicos

- Recolectar información estática y dinámica para construir el modelo de simulación de tráfico.
- Generar y calibrar un modelo de la movilidad vehicular del Centro Histórico de Cuenca.
- Verificar la eficiencia del PMEP en base a capacidades y niveles de servicio en las vías.



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se da a conocer los conceptos necesarios para la comprensión del tema que abarca este trabajo de titulación, enfocándose en tres temas. Por un lado se describen los múltiples parámetros que determinan el comportamiento del tránsito, así como su capacidad y nivel de servicio. La siguiente parte se enfoca en la simulación de tráfico, en donde se describe la metodología para la construcción de modelos y la plataforma de simulación empleada para dicha construcción. Finalmente, la última parte se enfoca en establecer las acciones, propuestas y a ser evaluadas, del Plan de Movilidad y Espacios Públicos.

2.1 Características del tránsito

Las características que determinan la planificación, diseño y la operación de las carreteras e instalaciones de transporte son fundamentalmente: la velocidad, tiempo de demoras, volumen y densidad. El conocimiento de estas variables es de gran importancia para determinar la calidad o nivel de servicio existente en un sistema vial, por lo que sus conceptos se sintetizan a continuación.

2.1.1 Volumen de tránsito

El volumen de tránsito se define como el número de vehículos que pasan por un punto a lo largo de una carretera o carril, durante una unidad de tiempo determinado. Viene dado por la expresión 2.1 [6]:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (2.1)$$

donde:

Q : Vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/período)

N : Número total de vehículos que pasan

T : Período determinado (unidades de tiempo)



La tasa de flujo es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un tramo vial. Se expresa mediante la ecuación 2.2:

$$q = \frac{N}{T} \quad (2.2)$$

Por otro lado, dentro de los volúmenes de tránsito horarios se define el volumen horario de máxima demanda (VHMD), que representa el número máximo de vehículos que pasan por un punto o sección transversal de un carril o calzada durante una hora consecutiva de un día en particular.

Finalmente, en proyectos de carreteras, el volumen horario de proyecto, para el año de proyecto se calcula mediante la expresión 2.3:

$$VHP = k(TPDA) \quad (2.3)$$

donde:

VHP: Volumen horario de proyecto

k: Valor esperado de la relación entre el volumen de la n-ava hora máxima seleccionada y el TPDA del año de proyecto

TPDA: Tráfico Promedio Diario Anual

Para proyecciones a años futuros en carreteras, se recomiendan los siguientes valores de *k* [6]:

- Para carreteras suburbanas: 0.08
- Para carreteras rurales secundarias: 0.12
- Para carreteras rurales principales: 0.16

2.1.2 Velocidad

Uno de los indicadores que más se utiliza para medir la eficiencia de un sistema vial es la velocidad de los vehículos, definida como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarde en recorrerlo. Se expresa mediante la expresión 2.4.

$$V = \frac{d}{t} \quad (2.4)$$



donde:

V : Velocidad constante (kilómetros por hora)

d : Distancia recorrida (kilómetros)

t : Tiempo de recorrido (horas)

De acuerdo a los estudios que se efectúen y los objetivos que se persigan existen conceptualmente varios tipos de velocidad, como se exponen a continuación [6].

- **Velocidad de punto o instantánea:** Es la velocidad en un punto o sección específica de la vía, sirve para evaluar las condiciones operacionales de tránsito, obteniendo una distribución de velocidades por grupos de usuarios.
- **Velocidad media temporal:** Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos o parte de los vehículos que circulan por una vía durante un intervalo de tiempo determinado. Matemáticamente se expresa mediante la ecuación 2.5.

$$\bar{V}_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2.5)$$

donde:

V_t : Velocidad media temporal

V_i : Velocidad de punto del vehículo

n : Número total de vehículos observados en el punto

- **Velocidad media espacial:** Es la media aritmética de las velocidades instantáneas de todos o parte de los vehículos que circulan por una vía durante un intervalo de tiempo determinado. Se calcula mediante la expresión 2.6.

$$\bar{V}_e = \frac{\sum_{j=1}^m V_j}{m} \quad (2.6)$$

donde:

V_e : Velocidad media espacial

V_j : Velocidad instantánea del vehículo

m : Número total de vehículos observados en el tramo

- **Velocidad de recorrido:** Resulta de dividir la distancia recorrida para el tiempo total empleado en recorrerla, incluidos los tiempos de demora. Para su determinación se utiliza el método del vehículo flotante.



- **Velocidad de marcha:** Resulta de dividir la distancia recorrida por el tiempo durante el cual el vehículo estuvo en movimiento, este no incluye demoras.

2.1.3 Densidad

La densidad de tránsito, conocida también como concentración de tránsito, se define como la cantidad de vehículos que ocupan una longitud específica de una vialidad en un momento determinado [6]. Altas densidades significan que los vehículos individuales se encuentran muy juntos entre sí, mientras que bajas densidades significan que existen grandes distancias entre vehículos. La densidad se expresa mediante la ecuación 2.7.

$$k = \frac{N}{d} \quad (2.7)$$

donde:

k: Densidad o concentración (vehículos por kilómetro)

N: Número de vehículos

d: Longitud de la vía (kilómetro)

2.2 Dispositivos de control de tránsito

La señalización de tránsito es un elemento fundamental para la circulación vehicular y peatonal, a fin de indicar a los usuarios de las vías la forma correcta y segura de transitar por ellas, con el propósito de evitar demoras y prevenir riesgos.

Señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, controlan el tránsito e indican a los usuarios las limitaciones y restricciones que gobiernan el sitio de circulación y la información necesaria, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera. Dichos dispositivos se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad pública, en el caso de Ecuador, por la Agencia Nacional de Tránsito (ANT).

Según [6], el ingeniero de tránsito generalmente es el encargado de determinar la necesidad de dispositivos de control, atendiendo a cuatro consideraciones básicas: diseño, ubicación, uniformidad y conservación.



2.2.1 Clasificación

Los dispositivos para el control de tránsito en calles y carreteras se clasifican como [6]:

1. Señales verticales: Preventivas, regulatorias e informativas
2. Señales horizontales: Rayas, marcas, botones
3. Obras y dispositivos diversos: Cercas, defensas, indicadores de obstáculos, etc.
4. Dispositivos para protección en obras: Conos, canalizadores, barreras, etc.
5. Semáforos: Vehiculares, peatonales, especiales

Los semáforos son dispositivos de control mediante los cuales se regula el movimiento vehicular y peatonal en calles y carreteras, por medio de luces de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control. Sin embargo, estos necesitan una correcta instalación y operación, de modo que ofrezcan diversas ventajas sobre otros dispositivos de control de tránsito.

2.3 Intersecciones

Se denomina como intersección al área compartida por dos o más caminos, cuya principal función es posibilitar el cambio de dirección de una ruta. La operación de este sistema es dependiente del número y tipo de usuarios que requieren el servicio, además representa un área crítica en el uso de calles y vialidades, siendo el punto focal de conflictos y congestión. Por esto es importante maximizar su seguridad y capacidad [7].

Las intersecciones pueden dividirse en función a distintos parámetros, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Clasificación de intersecciones en función de distintas tipologías [7].

Según su forma	Otras
Intersecciones en T	Sin control
Intersecciones en Y	Con control de prioridad
Intersecciones en Cruz	Redondeles
Escalonadas	Controladas por semáforos
Multivías	A desnivel

Las intersecciones de prioridad son controladas con señalización vertical, principalmente señales de "PARE" que indican la prioridad de paso para cada uno de los accesos a la intersección, de tal manera que se reduzca el conflicto a la hora de realizar maniobras para realizar los posibles giros.



En tanto que, se consideran como intersecciones semaforizadas a aquellas reguladas permanente o mayoritariamente mediante un sistema de luces que establecen prioridades de paso en la intersección. La semaforización en intersecciones puede ser un instrumento eficaz para reducir la congestión y mejorar la seguridad. Cualquier tipo de intersección es susceptible de semaforización, sin embargo son varios los factores que se deben considerar, como la intensidad de volumen de tránsito, el flujo peatonal, entre otros.

2.4 Capacidad vial

Una medida de la eficiencia con la que un sistema vial presta servicio a una demanda de tránsito, es su capacidad u oferta. De manera específica, la capacidad de una infraestructura vial se define como el máximo número de vehículos o peatones que puede transitar por un punto o tramo uniforme de un carril, en un período determinado de tiempo, bajo las condiciones imperantes de la vía y el tránsito. Mediante los análisis de capacidad, también se estima la máxima cantidad de vehículos que el sistema vial puede acomodar mientras se mantiene una calidad de operación o nivel de servicio; que es una medida cualitativa de las condiciones de operación y también de la percepción que se genera en los usuarios de la intersección [8].

Para evaluar la capacidad de una intersección de manera cualitativa y cuantitativa, se debe considerar que la capacidad varía o depende de factores que influyen directamente en ella [7], como:

- Condiciones de infraestructura vial: características geométricas como ancho de carriles, obstrucciones, velocidad de proyecto, alineamientos, etc.
- Condiciones de tránsito: distribución del tránsito en el tiempo y espacio, su composición y distribución direccional.
- Condiciones de los controles: dispositivos para control de tránsito como semáforos, señales y velocidades límite.

En los períodos de máxima demanda, un sistema puede llegar a funcionar a niveles de congestión, debido a una saturación por deficiencias en el movimiento vehicular con pérdidas de velocidad. Las demoras y colas, son un fenómeno de espera que está asociado a muchos problemas de tránsito, ocasionados por la variabilidad del flujo en el mismo. La congestión ocurre porque el sistema vial tiene una capacidad limitada y porque la demanda existente tiene un carácter aleatorio.



En tanto que, se define a la demora como el tiempo de viaje perdido debido a fracciones del tránsito y dispositivos de control. La demora total promedio para cualquier movimiento está en función de la capacidad del acceso y el grado de saturación.

Según [9], las demoras pueden ser:

- **Demoras fijas:** Componente de demoras que es causado por los dispositivos del control de tránsito, independientemente de los volúmenes de tránsito e interferencias presentes.
- **Demoras operacionales:** Componente de las demoras que es causado por la presencia e interferencia de otros vehículos.
- **Demoras de tiempo parado:** Componente de la demora durante el cual el vehículo no está en movimiento.
- **Demoras de tiempo de viaje:** Diferencia entre el tiempo de viaje total y el tiempo calculado basado en atravesar la ruta en estudio a una velocidad media correspondiente a un flujo de tránsito descongestionado sobre la ruta.

2.5 Niveles de servicio

Se define como una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores como la velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, comodidad, convivencia y seguridad vial [8].

Existen dos factores que afectan el nivel de servicio, como son los internos que corresponden a las variaciones de velocidad, el volumen, la composición del tránsito, etc.; y los externos que corresponden a las características físicas como ancho de carril, pendientes, etc.

El Manual de Capacidad Vial [10], establece seis niveles de servicio para distintas condiciones operacionales, los cuales se detallan a continuación:

- **Nivel de servicio A:** Representa circulación a flujo libre. Se tiene una libertad para seleccionar la velocidad deseada y maniobras dentro del tránsito. Es el nivel con mayor comodidad y conveniencia adecuado para la circulación del motorista, pasajero o peatón.
- **Nivel de servicio B:** Esta dentro del rango de flujo libre. La selección de velocidad deseada sigue inafectada, pero disminuye un poco la libertad de maniobra.



- **Nivel de servicio C:** Pertenece al rango de flujo estable. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros y la libertad de maniobrar comienza a ser restringida.
- **Nivel de servicio D:** Representa una circulación de densidad elevada, pero estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan restringidas y el conductor y peatón tienen comodidad y conveniencia bajo.
- **Nivel de servicio E:** El funcionamiento está cerca del límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida, se vuelve uniforme, la libertad para maniobrar es muy difícil, por lo que el vehículo o peatón tiene que ceder el paso.
- **Nivel de servicio F:** Representa condiciones de flujo forzado. Se produce cuando la cantidad de tránsito, excede la cantidad que puede pasar por él.

2.5.1 Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas

El nivel de servicio en intersecciones semaforizadas está directamente relacionado con el control de demoras, las cuales representan una medida del tiempo de parada, consumo de combustibles, entre otros.

Los criterios del nivel de servicio se dan en términos de la demora promedio por vehículo, durante un periodo de análisis de 15 minutos. Se prescriben seis niveles de servicio que se muestran en la Tabla 2.2 y cuyos criterios se describen a continuación.

Tabla 2.2: Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas [10].

Nivel de servicio	Demora por control (segundos/vehículo)
A	≤10
B	>10-20
C	>20-35
D	>35-55
E	>55-80
F	>80

- **Nivel de servicio A:** Operación con demoras menores de 10 segundos por vehículo. La mayoría de los vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen completamente. Longitudes de ciclo corto pueden contribuir a demoras mínimas.
- **Nivel de servicio B:** Operación con demoras en un rango de 10 a 20 segundos por vehículos. Esto implica que algunos vehículos comienzan a detenerse.
- **Nivel de servicio C:** Operación con demoras en un rango de 20 a 35 segundos por vehículo. La progresión del tránsito es regular y algunos vehículos comienzan a malograrse.



- **Nivel de servicio D:** Operación con demoras en un rango de 35 a 55 segundos por vehículo. Las demoras pueden deberse a una mala progresión del tránsito, longitudes de ciclo amplias, entre otras.
- **Nivel de servicio E:** Operación con demoras en un rango de 55 a 80 segundos por vehículo. Se considera como el límite aceptable de demoras.
- **Nivel de servicio F:** Operación con demoras superiores a los 80 segundos por vehículo, esto implica un congestionamiento y operación saturada en la intersección.

Para la determinación de los niveles de servicio se deben obtener las demoras para cada grupo de carriles, para cada acceso y para la intersección como un todo. En este documento no se calculan los niveles de servicio, sino se toman los obtenidos con el software de simulación, por lo que sí es de interés el cálculo de los niveles, se puede seguir la metodología descrita en la correspondiente bibliografía [6].

2.6 Semaforización

Los semáforos son dispositivos eléctricos cuya finalidad es permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que cruzan una determinada intersección. Además facilitan el control de tránsito y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores, como son el rojo, amarillo y verde.

Es muy importante que previo a la selección y funcionamiento de un semáforo, se efectúe un estudio completo de las condiciones de la intersección y del tránsito, a fin de garantizar una operación segura, eficiente y justa de todos los usuarios de la vía.

A fin de que los semáforos presenten diversas ventajas sobre otros dispositivos de control, deben tener una correcta instalación y operación. Caso contrario se notarán las desventajas que incidirán directamente en congestionamientos y demoras. A continuación se mencionan algunas de las ventajas y desventajas de estos dispositivos de control de tránsito [6].

Ventajas

- Ordenar la circulación del tránsito y optimizar la capacidad de las calles.
- Reducir la magnitud y frecuencia de ciertos tipos de accidentes.
- Con una correcta sincronización se puede establecer una circulación continua, a una velocidad constante que sea segura.
- Permitir el paso de vehículos y peatones de vías transversales a arterias con volúmenes de tránsito mayores.



- Aportar a una economía considerable con respecto a otras formas de control.

Desventajas

- Incurrir en gastos injustificados ante un problema que pudo haberse solucionado con señalización.
- Una mala calibración y ajuste de los tiempos en los semáforos, producen demoras y pérdidas de tiempo, además de incrementar el número de accidentes.
- Debido a su funcionalidad monótona, producen confianza en los conductores que puede generar altercados y choques si es que algún usuario realiza alguna maniobra indebida.

2.6.1 Clasificación

Los semáforos para el control de tránsito de vehículos en las distintas zonas se clasifican de la siguiente forma [9]:

- a) Semáforos de tiempos fijos o predeterminados (dependientes del tiempo).
- b) Semáforos accionados por el tránsito (dependientes del tránsito):
 - Totalmente accionados (totalmente dependientes del tránsito).
 - Parcialmente accionados (semindependientes del tránsito).

Un semáforo de tiempo fijo es un dispositivo para el control de tránsito en intersecciones donde los patrones del tránsito son relativamente estables, o donde las variaciones de intensidad de circulación se pueden adaptar a una programación de tiempo determinado o una serie de programaciones establecidas. En intersecciones aisladas se puede utilizar estos semáforos sin necesidad de sincronizarlos con otros, sin embargo si existe la necesidad de coordinarlos con otros semáforos se pueden utilizar mecanismos de sincronización.

Por otro lado, los semáforos accionados por el tránsito tienen como principal característica en su operación, que la duración de los ciclos responde, en general, a la variación en la demanda de tránsito vehicular. Dicha demanda es detectada por aparatos detectores conectados al control del semáforo, el cual se ajusta continuamente en la duración del ciclo y en la división interna del mismo para satisfacer la demanda.

Si los detectores son usados solamente en algunos de los accesos a una intersección determinada, el tipo de control es denominado semi accionado. En tanto que, si es usado en todos los accesos, se denomina totalmente accionado.



2.6.2 Terminología básica

Para el análisis del control de intersecciones con semáforos y para la distribución de viajes, se deben citar algunos términos básicos o parámetros de tiempo, que se mencionan a continuación [10]:

- **Indicación de señal:** se refiere al encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces simultáneamente.
- **Ciclo o longitud de ciclo:** tiempo requerido para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- **Movimiento:** maniobra o conjunto de maniobras en un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
- **Intervalo:** cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones del semáforo.
- **Fase:** combinación de movimientos que operan simultáneamente, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar o amarillo.
- **Reparto:** porcentaje de la longitud del ciclo asignada a cada una de las diversas fases.
- **Intervalo verde:** intervalo de derecho de paso durante el cual la indicación de señal es verde.
- **Intervalo de cambio:** tiempo de exposición de la indicación amarilla que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución previo al paso de una fase a la siguiente.
- **Intervalo de despeje o todo rojo:** tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara para entrar a la intersección. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del amarillo de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho al paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde.
- **Intervalo de cambio de fase:** intervalo que puede consistir de solamente un intervalo de cambio amarillo o que puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo. Se conoce también como entre verde o intermedio.



2.6.3 Cálculo de los tiempos de un semáforo

Un objetivo permanente al realizar la programación de los tiempos de un semáforo es que cada fase debe permitir el movimiento del mayor número de vehículos y un mínimo de demoras. El número de fases debe reducirse al mínimo, considerando la seguridad y eficiencia [6].

La selección de los movimientos que se incluyen en una fase, debe tender a reducir a un mínimo la frecuencia y gravedad en los puntos de conflicto, e igualmente las demoras. Una fase comienza con el amarillo que detiene a los vehículos que pierden el derecho al paso y termina con el final del verde de los vehículos que lo ganan. Por lo tanto, una fase consta de un intervalo amarillo, uno todo rojo y uno verde. La distribución de los tiempos en cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes de tránsito de los movimientos involucrados.

En este trabajo de titulación no se pretende realizar cálculos de los tiempos de cada fase de un semáforo, pero para el interesado se recomienda seguir la metodología citada en la referencia bibliográfica [6].

2.7 Simulación de tráfico

La simulación de tráfico representa una herramienta para el análisis y evaluación de la interacción entre la oferta y demanda en un sistema de tráfico, a través del desarrollo de modelos que recrean el comportamiento en un tiempo definido, de los vehículos dentro una infraestructura vial. Este tipo de simulaciones permiten predecir las condiciones del sistema de tráfico ante una determinada situación, debiendo contar con una gran cantidad de datos del sistema para implementarla.

2.7.1 Generalidades de modelación

Un modelo, es en esencia, una representación abstracta de la realidad, empleado con el fin de lograr una mayor claridad conceptual de la misma, reduciendo su capacidad y complejidad a niveles que permitan comprenderla y especificarla de manera adecuada para el análisis [11].

Actualmente existen tres tipos de modelos de simulación de acuerdo al Manual de Capacidad Vial [10]: modelos macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos; los cuales varían en función de la interacción entre la demanda y la oferta del sistema de transporte.

Los modelos macroscópicos describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios. Son útiles para hacer representaciones generales del sistema, por lo que son implementados en áreas de estudio de gran tamaño y requieren menos información para su construcción. Algunos de sus principales usos son: planeación del sistema de tráfico, optimización de la capacidad vial, análisis de la capacidad de la red, evaluación de políticas, etc.

Por otro lado, un sistema de simulación microscópica considera el comportamiento individual de cada componente (vehículo, peatón), y desde allí se obtienen resultados aplicables a la totalidad de la población, además de permitir la inclusión de elementos de infraestructura y demanda con un alto grado de detalle. Por esta razón estos modelos son utilizados para evaluar el impacto esperado de la implementación de sistemas inteligentes de transporte.

Finalmente, los modelos mesoscópicos buscan presentar un mayor detalle que los modelos macroscópicos, representando la demanda de tráfico en grupos de vehículos que cumplan características similares, para luego determinar la interacción entre la demanda y oferta de tráfico. Estos modelos son utilizados principalmente para la configuración y optimización de los tiempos de semáforos.

2.7.2 Proceso de simulación de tráfico

La metodología para construir modelos de micro simulación es muy amplia, existiendo diferentes propuestas para su aplicación. Sin embargo, todas ellas presentan una estructura semejante que permite generalizar partes del proceso, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.1 [12], [13].

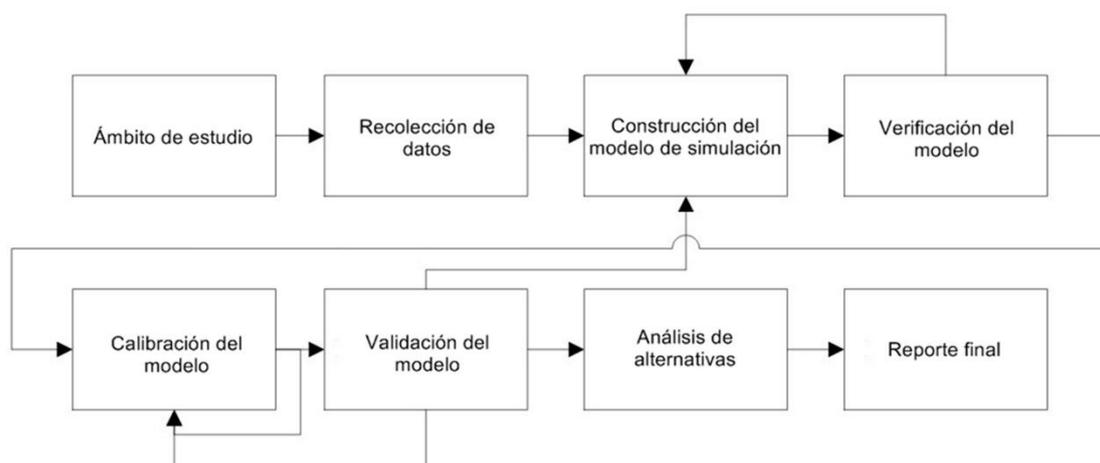


Fig. 2.1: Flujo del proceso de micro simulación.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Las etapas que componen el diagrama de flujo del proceso de micro simulación se describen en los siguientes subcapítulos.

2.7.2.1 Ámbito de estudio

Esta primera etapa hace referencia a la planeación, en donde se deben definir los objetivos y zona de estudio, actividades, entre otros.

2.7.2.2 Recolección de datos

En esta etapa se debe capturar toda la información necesaria para la construcción y calibración del modelo de simulación. Esta información puede ser de dos tipos [14]:

- Estática: Hace referencia a las características físicas y técnicas de la red, como número, ancho y longitud de carriles, ubicación de intersecciones y dispositivos de control, geometría y funcionamiento de las paradas de bus, entre otros.
- Dinámica: Agrupa la información que varía a lo largo de la simulación, como la demanda de tráfico representada por volúmenes de giro o matrices origen- destino, y la agenda semafórica.

2.7.2.3 Construcción del modelo de simulación

Uno de los pasos fundamentales para la construcción del modelo es la selección de una plataforma de simulación, que estará en función de los objetivos del estudio y la naturaleza del problema a resolver [13].

Luego se debe construir un modelo que represente la oferta y demanda de tráfico en la zona, implementando la información estática y dinámica recolectada.

2.7.2.4 Verificación del modelo

Esta etapa tiene por objeto el identificar posibles errores en el modelo, para esto se debe hacer una revisión detallada, a fin de garantizar transparencia en los análisis de simulación.

2.7.2.5 Calibración del modelo

Con el fin de acercar el comportamiento del simulador a la realidad, mejorando su calidad y precisión, se realiza la calibración del modelo por medio de un proceso de optimización que encuentre la combinación óptima para los valores de los parámetros del mismo, donde se minimice la distancia existente entre las variables estimadas por el simulador y las capturadas en la realidad. Debido a la cantidad de parámetros que posee un simulador es ineficiente calibrarlos todos, por lo es que es necesario buscar los valores óptimos de los parámetros.



La tarea final de calibrar el modelo requerirá comparar un conjunto de datos reales con los flujos resultantes del modelo, de manera que se obtengan un coeficiente de determinación (R^2) y una bondad de ajuste (GEH) representativos.

El R^2 es un estadístico que mide la proporción de variación de un valor con respecto a otro, cuyo valor conforme más se acerca a 1, indica una mayor correlación de los datos y una mejor calidad del modelo.

Por otro lado, el GEH (llamado así por su inventor Geoffrey E. Havers), es un parámetro estadístico que tiene la ventaja de tomar en cuenta el error relativo y de no depender de valores nulos que pueden aparecer, y viene dado por la expresión 2.8 [15]:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(Y_s - Y_o)^2}{(Y_s + Y_o)}} \quad (2.8)$$

donde:

Y_s : Volumen de tráfico simulado

Y_o : Volumen de tráfico contado

Generalmente, se acepta que un modelo de asignación de tráfico estará satisfactoriamente calibrado si [16]. Al menos el 60% de los arcos tienen un GEH inferior a 5, el 95% de los arcos tienen un GEH inferior a 10, y todos los arcos tienen un GEH inferior a 12.

2.7.2.6 Validación del modelo

Al finalizar la etapa de calibración, se debe validar el modelo realizando una simulación con datos que no hayan sido utilizados anteriormente. El objetivo es probar que los valores de los parámetros resultantes del simulador representen la realidad.

2.7.2.7 Análisis de alternativas

En esta etapa se analizan los resultados del modelo, para ello se inician simulando diferentes escenarios planteados y en función de los resultados del simulador se puede estimar la respuesta del sistema de tráfico ante los distintos escenarios propuestos.



2.8 Plataformas de simulación

Debido a la complejidad y magnitud del control en un sistema de tráfico, se recurre a la utilización de plataformas de simulación, que permiten llevar a cabo simulaciones de tráfico, reproduciendo características del entorno real. Existen distintos tipos de plataformas de simulación, que varían en función del modelo de tráfico que se utilice. En este documento se enfocará la utilización del software AIMSUN [17].

Aimsun es una herramienta informática capaz de integrar en una sola aplicación tres tipos de modelos de transporte: un simulador microscópico, mesoscópico y macroscópico. Su desarrollo ha sido posible gracias a más de 20 años de investigación, a las publicaciones científicas y la información que proviene de los miles de proyectos realizados por los usuarios [18].

Una de sus funcionalidades más destacadas es su rapidez de micro simulación, además ofrece distintas opciones para incluir varios escenarios en una misma red como demandas, planes de control, acciones de gestión de tráfico, etc.

Entre las principales aplicaciones del software se pueden mencionar:

- Optimización del plan de control de señales de semáforos y evaluación de control adaptativo.
- Evaluación de políticas de velocidad variable y otros tipos de sistemas de transporte inteligentes.
- Evaluación de estrategias de gestión en la demanda de viajes.

2.9 Acciones del Plan de Movilidad y Espacios Públicos

Los objetivos generales planteados en el PMP son [4]:

- Establecer una nueva distribución del espacio público, en donde se priorice la presencia del peatón como protagonista de éste y se favorezca la circulación en modos no motorizados.
- Definir un nuevo modelo para el sistema de transporte público, garantizando en la distribución del espacio y los recursos necesarios para su circulación y mejoramiento de tiempos de traslado.



- Adecuar el tráfico de paso de vehículos privados a la sensibilidad de los espacios del centro, reasignando circuitos periféricos para aquellos que sin tener como destino final el Centro Histórico lo atraviesan para “acortar distancias” en su movilización de un lugar a otro de la ciudad.
- Adecuar el funcionamiento de los equipamientos y actividades comerciales que son generadores de viajes para la carga y descarga de productos y mercadería en general, considerar en la distribución del espacio áreas para estos fines en lugares y horarios adecuados que no interfieran en el normal funcionamiento del viario y de los espacios de convivencia.
- Implementar como política del área central rangos de velocidad no superiores a los 30 km/h. Este límite deberá ser la norma rectora en los diseños viales, mediante la implementación de recursos que contribuyen a controlar y mantener este rango máximo.
- Instaurar como política para los estacionamientos públicos en el área central que deben estar priorizados para el uso de habitantes y vecinos del Centro Histórico y personas con discapacidad. Esto implicará regular cuidadosamente la apertura de nuevos equipamientos, dando respuestas directas a los problemas de residentes y empresarios.
- Reorganizar los mecanismos de estacionamientos en el área central de uso público para visitantes, adecuando la periferia para estas demandas, por tanto, implementar estacionamientos de borde para personas que visitan momentáneamente el Centro Histórico. Este criterio se complementa con los propósitos de incentivar el uso de modos de transporte no motorizado.
- Estructurar una red de espacios públicos como parques, plazas, plazoletas e inmuebles de relevante importancia, que motiven a recorrerla. Esto propiciará un paulatino empoderamiento del área central.

2.9.1 Acciones a ser evaluadas

Desde el punto de vista de la gestión de tráfico, en la nueva jerarquía para el viario de Cuenca se implementan intersecciones que regulen las velocidades en recorridos largos dentro de la zona urbana para disuadir los tráficos de paso.

Dentro de este contexto la acción a evaluarse es la redistribución vial en el Centro Histórico en función de las velocidades límites establecidas [1], que se presentan en las Figuras 2.2.a y 2.2.b, a continuación.

- **VÍAS 10:** Constituyen 11,7 km, que equivalen al 24,4% del total de vías de la zona.
- **VÍAS 20:** Constituyen 19,7 km, que equivalen al 40,8% del total de vías de la zona.
- **VÍAS 30:** Constituyen 11,1 km, que equivalen al 23% del total de vías de la zona.
- **VÍAS 40:** Constituyen 5,7 km, que equivalen al 11,8% del total de vías de la zona.

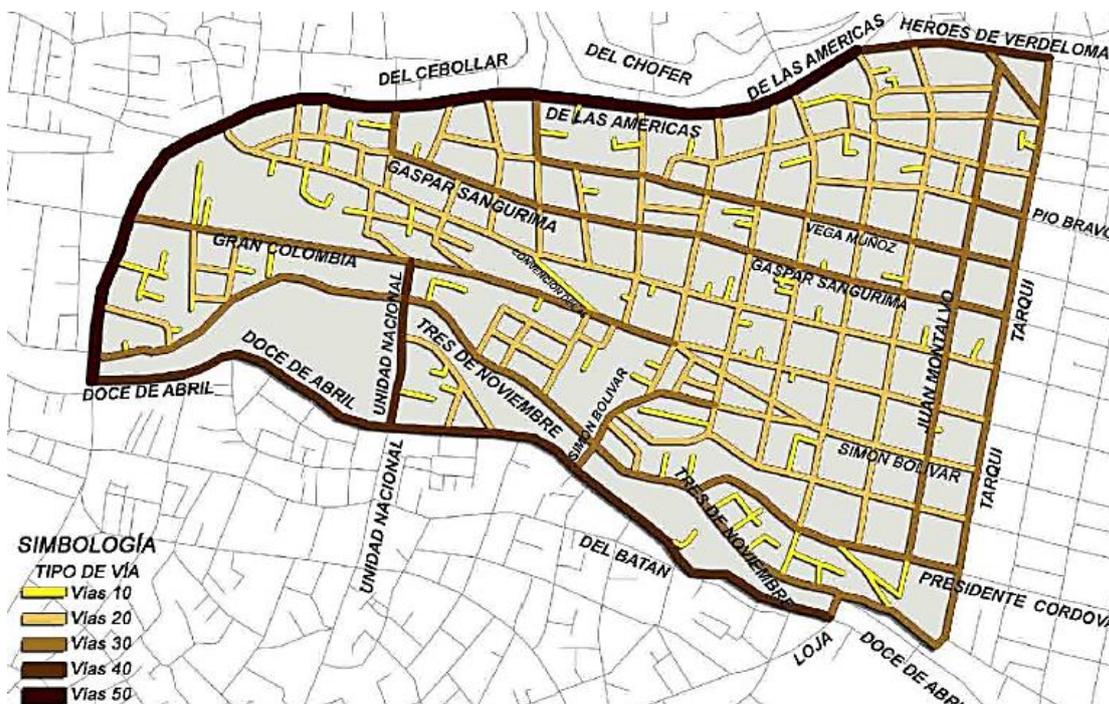


Fig.2.2.a: Jerarquización vial del Centro Histórico, Parte 1 [1].

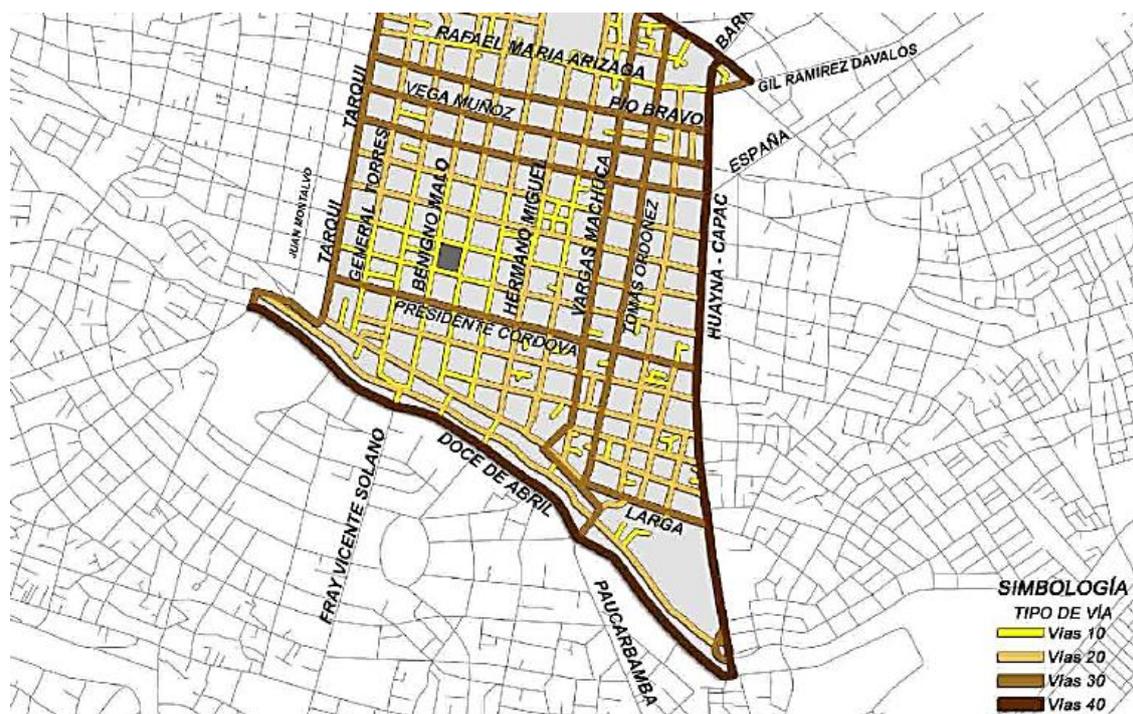


Fig.2.2.b: Jerarquización vial del Centro Histórico, Parte 2 [1].



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla como primera instancia, el ámbito de estudio y la información estática y dinámica recolectada para la construcción del modelo. Posteriormente, se describe el procedimiento para la construcción y calibración del modelo de micro simulación para el año 2015, detallando ciertos criterios y consideraciones realizadas en su desarrollo. Finalmente, se presenta el análisis de alternativas, en donde se plantean dos escenarios para el año 2018, detallando los cambios y consideraciones que estos implican para su implementación.

3.1 Micro simulación de tráfico

Como se mencionó anteriormente la simulación microscópica sirve para entender el funcionamiento de un sistema de tráfico y la interacción existente entre sus elementos, de modo que se puedan probar distintos escenarios. Dicha simulación tiene por objetivo construir un modelo del sistema de transporte que refleje la realidad con un alto nivel de exactitud, lo que implica una mayor cantidad de información a recolectarse y aumenta su costo computacional.

A continuación, se desarrolla y describe el proceso para la construcción del modelo de simulación del Centro Histórico de Cuenca.

3.1.1 Ámbito de estudio

Con los objetivos claramente planteados anteriormente para el desarrollo de este trabajo de titulación, se procede a delimitar la zona de estudio, que comprende el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca, Azuay, Ecuador. Dicha zona está limitada con la calle Gaspar Sangurima al norte, la calle Larga al sur, al este con la Av. Huayna Cápac y al oeste con la calle Octavio Cordero.

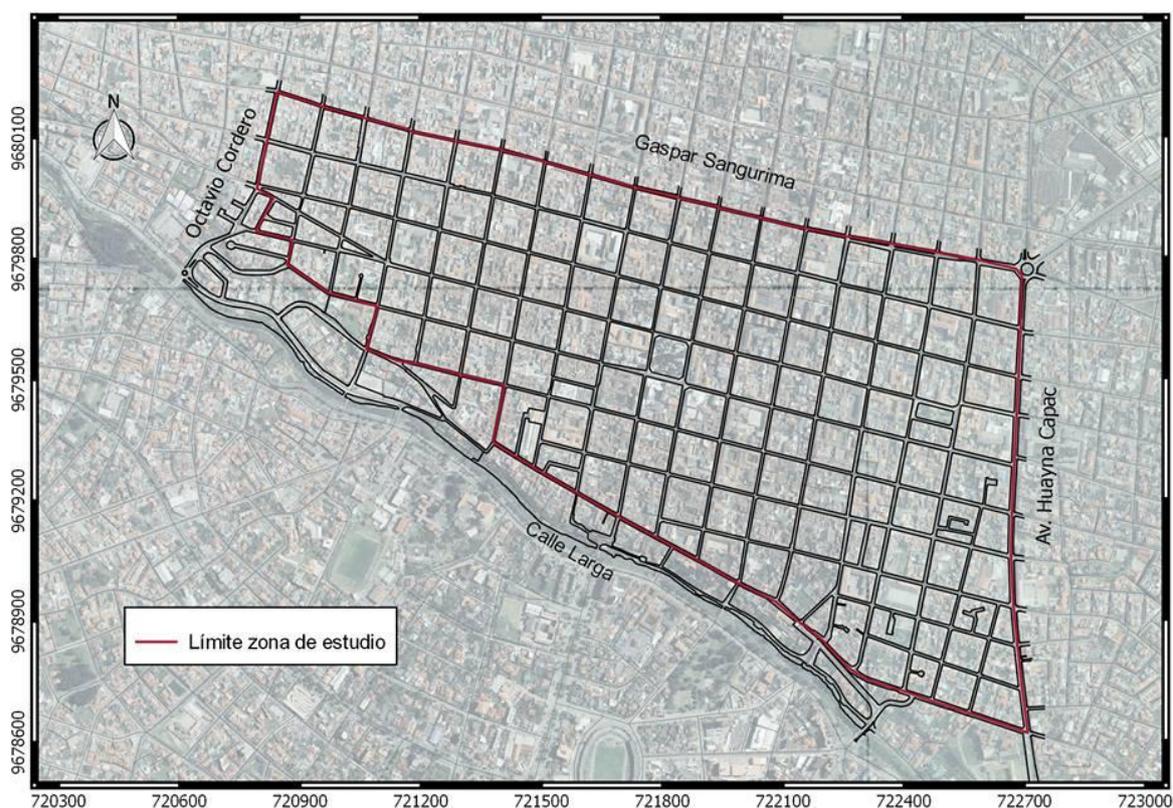


Fig. 3.1: Esquematación del área de estudio.

3.1.2 Recolección de datos

Para la construcción del modelo de micro simulación del Centro Histórico de Cuenca se recopiló y levantó la información que se detalla a continuación.

3.1.2.1 Estática

- **Características geométricas:** Ubicación de 160 intersecciones en el área de estudio, mostradas en el Anexo 3.1. Además, mediante un levantamiento en campo se determinó el número y tipo de carriles en base a inspección visual, y el ancho de los mismos con un distanciómetro laser.
- **Velocidades propuestas:** Velocidades de circulación en las distintas vías que conforman el viario del Centro Histórico (Ver Anexo 3.2). Esta información se tomó de levantamientos realizados por el Municipio de Cuenca para la elaboración del PMP.
- **Transporte público:** Rutas, ubicación de paradas e intervalos de entrada y salida de las 44 líneas de buses que atraviesan el área de estudio. La ubicación de paradas se presenta como Anexo 3.3, con la correspondiente tabla de las líneas que pasan por cada una de ellas.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- **Parqueaderos:** Ubicación y capacidad de 141 parqueaderos públicos y 57 tarifados, existentes en el área de estudio (Ver Anexo 3.4).
- **Dispositivos de control:** Dado que en la zona de estudio existen intersecciones de prioridad y semaforizadas, se determinó la ubicación de señales reglamentarias de “PARE” y “Ceda el Paso” mediante inspección visual (Ver Anexo 3.5). Además, se determinó la ubicación de los semáforos en el Centro Histórico, con información brindada por la Central Semafórica del Municipio de Cuenca.

Cabe recalcar que la información de transporte público y parqueo levantada en campo, fue corroborada con levantamientos realizados por el Municipio de Cuenca para la ejecución del Plan de Movilidad y Espacios Públicos.

3.1.2.2 Dinámica

- **Matriz Origen- Destino:** Obtenida de un registro de placas en un período de 12 horas de muestreo, desde las 07h00 hasta las 19h00. Para la contabilización de placas determinaron 39 estaciones ubicadas en el Centro Histórico [19].
- **Aforos vehiculares:** El flujo vehicular existente en las intersecciones del área de estudio es registrado de forma automática y permanente por la Central Semafórica de la ciudad, a través del software SCATS [20]. Para la elaboración del modelo se analizó los datos de flujo registrados para un día, mes y año determinado, mismos que se especifican más adelante.
- **Agenda semafórica:** En el Centro Histórico existen semáforos centralizados, mismos que tienen ciclos variables en función del tránsito existente en un momento determinado y son asignados por el software SCATS. Por tal razón, para la elaboración del modelo de simulación se consideró que dichos semáforos tienen tiempo fijo.

3.1.3 Construcción del modelo de simulación

El modelo calibrado de micro simulación se desarrolla para el año 2015. Para su construcción se empleó el software Aimsun, versión 8.1. El acceso a la licencia para el empleo de dicho software, fue facilitado por la Secretaria de Movilidad de la Municipalidad de Cuenca.

3.1.3.1 Creación de la red

Para la creación de la red se ha tomado como referencia el trazado vial actual, obtenido de la base cartográfica del “Open Street Maps” [18]. Las características geométricas y de diseño



fueron modificadas y complementadas en función de la información estática y dinámica anteriormente mencionada, realizando ciertas consideraciones e hipótesis que se mencionan más adelante.

3.1.3.2 Determinación de la Hora de Máxima Demanda (HMD)

La HMD se determinó a partir de los aforos vehiculares registrados por la Central Semafórica. Dado que dicho registro es de forma automática y mecanizada, existe ausencia de datos en distintas intersecciones y distintos períodos, debido a cortes de energía eléctrica o falta de mantenimiento de los dispositivos implementados en los semáforos para el registro.

Por ende, se escogió el día y mes del año 2015 que contenía la mayor cantidad de datos existentes en las intersecciones del área de estudio, a fin de obtener la mayor aproximación.

Por simplicidad, se analizaron los datos registrados en las intersecciones de los límites del área de estudio. Se obtuvo que, para 19 intersecciones el día que contiene mayor información es el jueves 12 de marzo y el período que indica la condición vehicular más crítica es de 12h30 a 13h30.

3.1.3.3 Agenda semafórica

Para fines de desarrollo de este proyecto, en la construcción del modelo se realizaron las siguientes hipótesis con respecto a la información dinámica de la agenda semafórica:

- Dado que no existía registro de datos de la agenda semafórica del año 2015, se consideró que los tiempos semafóricos de un jueves del año 2017 serán los mismos para el año 2015. Dichos tiempos se obtuvieron dentro de la hora de máxima demanda.
- Las intersecciones de la red tienen 2 grupos semafóricos, a excepción de la intersección ubicada en la calle Larga y Bajada de Todos Santos que tiene 3 grupos, dado que se considera una fase de 15s para cruce peatonal. Dichos grupos son asignados en función de los giros permitidos en cada intersección.
- Se creó un plan de control de tipo fijo para cada una de las intersecciones semaforizadas [18]. Además, el tiempo semafórico en un corredor vial se consideró como el promedio de los tiempos semafóricos en las distintas intersecciones que componen dicho corredor. En la Tabla 3.1 se presentan los planes de control de los corredores que componen la red.

Cabe recalcar que para todos los corredores se consideró un tiempo de ámbar de 3 segundos y un tiempo de rojo total de 1 segundo. Además, en la Tabla 3.2 se presentan los tiempos para la intersección que contiene 3 grupos semafóricos, mencionada anteriormente.

Tabla 3.1: Tiempos semafóricos en los corredores que componen la red.

Corredor	Ciclo Total (s)	Tiempo verde (s)	Tiempo rojo (s)	Rojo (%)
Gaspar Sangurima	153	66	79	54
Simón Bolívar	156	76	72	49
Mariscal Sucre	154	77	69	48
Presidente Córdova	156	84	63	43
Juan Jaramillo	149	75	66	47
Calle Larga	112	49	55	53
Gran Colombia	148	64	76	54
Mariscal Lamar	150	74	68	48
Octavio Cordero	149	53	88	63
Huayna Cápac	150	53	89	63
Honorato Vázquez	152	80	65	45

Tabla 3.2: Tiempos semafóricos: calle Larga y Bajada de Todos Santos.

Ciclo Total (s)	Fase B (s)	Fase A (s)	Fase C (s)
100	15	37	41

3.1.3.4 Demanda de tráfico

Parte fundamental en la construcción del modelo es la asignación de la demanda de tráfico, que está en función de una matriz O-D (origen-destino). En nuestro caso la matriz “z” empleada para la simulación de tráfico se obtuvo tomando como base una matriz “x”, realizada por la Universidad del Azuay [19], expresándola en porcentajes y acoplándola con los registros de aforos vehiculares de la Central Semafórica, mediante el siguiente procedimiento:

1. Se determinó el factor k de la Eq.2.3, considerando como VHP al volumen horario de máxima demanda, y como TPDA al volumen registrado por la Central Semafórica, en las 24h del día jueves 12 de marzo.
2. Dado que los datos de la matriz x se obtuvieron en un período de aforo de 12 horas, como primera instancia ésta se proyectó a la hora de máxima demanda, empleando el factor k . De la matriz x no se consideraron los datos de vehículos que registraban



entrada pero no salida y viceversa, dado que no se conoce la dinámica que estos tendrán en la zona de estudio.

3. La nueva matriz “y” con las 39 zonas que se muestran en la Tabla 3.3, se expresó en forma porcentual, dividiendo cada uno de sus elementos para el número total de vehículos que entraron en el área de estudio.
4. De la matriz “y” se obtuvo el porcentaje total de vehículos en cada entrada y salida (%vol), sumando el total de cada fila y columna respectivamente.
5. De las 39 zonas de la matriz “y”, se seleccionaron las que tenían registro de datos en la Central Semafórica.
6. Se obtuvo el volumen registrado por Central Semafórica en las zonas seleccionadas en el paso anterior, para la hora de máxima demanda (vol.1).
7. Debido a que estos volúmenes registrados no especifican la cantidad de vehículos que puede tener cada giro en una intersección, se realizó el siguiente sub procedimiento:
 - 5.1. Obtención de porcentajes de giros en determinadas intersecciones, mediante aforos direccionales realizados en campo.
 - 5.2. Obtención del volumen de vehículos para cada giro de una intersección (vol.2), como el producto entre el vol.1 y los porcentajes obtenidos en campo.
 - 5.3 Obtención del volumen total de vehículos en una intersección (vol.3), al sumar el vol.2 obtenido para cada giro en el paso 5.2.
8. En las zonas seleccionadas en el paso 4, se realizó el cociente entre el vol.3 y el %vol, obteniéndose como resultado varios volúmenes probables del total de vehículos que transitan en el Centro Histórico.
9. Se obtuvo el volumen total de vehículos en el área de estudio (vol.4), como el promedio de todos los volúmenes probables obtenidos, considerando un nivel de confianza del 95%. Los parámetros estadísticos de este volumen se obtuvieron con las ecuaciones 3.1 a 3.3 [21].
10. Finalmente se obtuvo la matriz “z” definitiva, como el producto del vol.4 y la matriz “y”.

Posteriormente, es necesario definir una configuración de centroides en función de las 39 zonas componentes de la matriz “z” [18], que representarán las fuentes y sumideros de vehículos en la red.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.1)$$

$$\text{Error estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

$$\text{Margen de error} = z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

donde:

σ^2 : Desviación estándar

x_i : Valor de la variable i

\bar{x} : Media aritmética

n : Tamaño de la muestra

z : Valor asignado en función del nivel de confianza deseado

Tabla 3.3: Zonas componentes de la matriz "y" [19].

Entrada			Salida		
Z1	Gran Colombia	Octavio Cordero	Z20	Simón Bolívar	Paseo Tres de Noviembre
Z2	Mariscal Sucre	Miguel Vélez	Z21	Baltazara de Calderón	Octavio Cordero
Z3	Condamine	Paseo Tres de Noviembre	Z22	Benigno Malo	Av. 12 de Abril
Z4	Todos Santos	Calle Larga	Z23	Todos Santos	Calle Larga
Z5	Honorato Vázquez	Huayna Cápac	Z24	Juan Jaramillo	Huayna Cápac
Z6	Presidente Córdova	Huayna Cápac	Z25	Mariscal Sucre	Huayna Cápac
Z7	Simón Bolívar	Huayna Cápac	Z26	Gran Colombia	Huayna Cápac
Z8	Mariscal Lamar	Huayna Cápac	Z27	Gaspar Sangurima	Huayna Cápac
Z9	Tomás Ordoñez	Gaspar Sangurima	Z28	Manuel Vega	Gaspar Sangurima
Z10	Mariano Cueva	Gaspar Sangurima	Z29	Vargas Machuca	Gaspar Sangurima
Z11	Antonio Borrero	Gaspar Sangurima	Z30	Hermano Miguel	Gaspar Sangurima
Z12	Benigno Malo	Gaspar Sangurima	Z31	Luis Cordero	Gaspar Sangurima
Z13	General Torres	Gaspar Sangurima	Z32	Padre Aguirre	Gaspar Sangurima
Z14	Juan Montalvo	Gaspar Sangurima	Z33	Tarqui	Gaspar Sangurima
Z15	Coronel Tálbot	Gaspar Sangurima	Z34	Estévez de Toral	Gaspar Sangurima
Z16	Miguel Heredia	Gaspar Sangurima	Z35	Miguel Vélez	Gaspar Sangurima
Z17	Octavio Cordero	Gaspar Sangurima	Z36	Mariscal Lamar	Octavio Cordero
Z18	Los Molinos	Calle Larga	Z37	Presidente Córdova	Paseo 3 de Noviembre
Z19	Alfonso Malo	Huayna Cápac	Z38	Calle Larga	Huayna Cápac
-	-	-	Z39	Alfonso Jerves	Huayna Cápac



3.1.3.5 Consideraciones e hipótesis para el desarrollo del modelo

Con el fin de recrear de manera más aproximada el comportamiento real del sistema de tráfico en el Centro Histórico, se realizaron las siguientes hipótesis y consideraciones:

- Existen únicamente intersecciones de prioridad y semaforizadas en la red, categorizadas en función de la señalización y semáforos existentes en el área de estudio.
- Las vías que conforman la red son de dos tipos: calles semaforizadas y carreteras urbanas. Sus velocidades se asignaron en función de las velocidades de circulación del Anexo 3.2.
- Las características de los vehículos de diseño, tipo A (vehículo liviano) y B (bus), se tomaron de la Norma Ecuatoriana Vial [22].
- Los intervalos de entrada y salida del transporte público se obtuvieron dentro de la Hora de Máxima Demanda.

3.1.4 Verificación del modelo

Con el fin de realizar la verificación del modelo, se realizó una primera simulación, siendo necesario crear un escenario con la demanda de tráfico, grupos semafóricos y plan de transporte público anteriormente mencionados [23].

Tras esta primera simulación se encontraron y corrigieron errores correspondientes a giros mal asignados en algunas intersecciones, grupos y tiempos semafóricos, creación de intersecciones reguladas con la señal de “Ceda el Paso”. Además se verificó la correcta asignación de datos de demanda de tráfico, a fin de garantizar una correcta dinámica de circulación.

3.1.5 Calibración del modelo

El parámetro a calibrarse en el desarrollo de nuestro modelo, es el flujo. Para ello se implementaron detectores en varias calles del área de estudio (Ver Anexo 3.6), los cuales registran la cantidad de vehículos que pasan por las mismas (datos simulados) y serán comparados con el volumen de vehículos registrados por la Central Semafórica (datos reales).

Tras la primera simulación realizada, se determinó que la cantidad de vehículos registrada por los detectores era muy inferior a la del conjunto de datos reales, por ende se aplicó el siguiente procedimiento y criterios:



- Con el fin de evitar el bloqueo de la circulación en uno u otro sentido en las intersecciones de la zona de estudio, se utilizó la opción de “yellow box” dada en el software Aimsun [18].
- Se implementó las zonas de parqueo público y tarifado, a fin de generar un aumento del flujo vehicular en la zona de estudio, dado que generan y atraen viajes en la hora de máxima demanda.
- En función de la longitud del parqueo tarifado en una calle determinada, se determinó la cantidad de vehículos que pueden ocupar dicho parqueo. Estos se adicionaron a parqueos públicos que se encuentran simultáneos a dichas zonas tarifadas, en función de su capacidad.
- En función de la capacidad se clasificaron los parqueaderos en cuatro grupos, que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 3.4: Clasificación de parqueaderos públicos.

Capacidad (vehículos)	Clasificación
15 - 30	Pequeño
>30 - 70	Mediano
>70 - 130	Grande
>130	Extra grande

- Se asignaron nuevos centroides a las zonas de parqueo mencionadas, debiendo agrandar la matriz O-D empleada en la construcción del modelo. A cada nuevo centroide se le asignó un porcentaje de vehículos que pueden atraer o generar los parqueaderos en función de su capacidad.
- Posteriormente a los nuevos centroides se asignó una cierta dinámica de circulación vehicular para evacuar hacia las diferentes salidas del Centro Histórico, o realizar un cambio de parqueadero. Dicha asignación se realizó en función de la capacidad de los parqueaderos y el comportamiento de los vehículos en la hora de máxima demanda.

Otro punto clave en la calibración fue las correcciones que se realizaron en la red, como por ejemplo el aumento del tiempo semafórico en determinadas intersecciones y la omisión de algunas señales reglamentarias de “PARE”, debido a que el software se fundamenta en la Norma HCM que establece que los vehículos no puedan avanzar dicha señal si la distancia de visibilidad es menor a 200m, lo cual no se cumple en nuestro medio.



El conjunto de datos reales (volumen ingresado anteriormente en cada detector) vs los datos simulados se visualizan mediante una regresión lineal. Además, el software de modelación Aimsun calcula de forma automática la diferencia absoluta y relativa de cada par de valores, y la desviación en cada detector de ajuste. Adicionalmente muestra todos estos valores en una tabla, conjuntamente con el valor del “GEH”.

3.1.6 Análisis de alternativas

Acorde a los objetivos de este trabajo de titulación, se plantearon dos escenarios para el año 2018, a fin de evaluar las acciones encaminadas a la aplicación del P MEP en el Centro Histórico de Cuenca. El primero corresponde a la dinámica de circulación vehicular sin la implementación de velocidades límite propuestas por el P MEP, y el segundo corresponde a la dinámica de circulación vehicular con la implementación de velocidades límite.

La implementación de dichos escenarios en el modelo calibrado para el año 2015, implicó los cambios y consideraciones que se mencionan a continuación:

- Se implementó las velocidades de circulación propuestas por el P MEP para el viario del Centro Histórico, presentadas en el punto 2.9.2 del marco teórico. Esta acción se consideró únicamente para el segundo escenario.
- Se realizó el cierre y disminución de carriles en las calles Gran Colombia, Mariscal Lamar y Gaspar Sangurima, en función de la ruta que seguirá el Tranvía “4 Ríos”. Además en determinadas intersecciones de estas mismas calles, se restringieron los giros que se muestran en el Anexo 3.7.
- Las intersecciones Miguel Vélez- Simón Bolívar y Miguel Vélez- Baltazara de Calderón, cambiaron de intersecciones de prioridad a intersecciones semaforizadas, por lo que se implementó estos nuevos grupos semafóricos y sus respectivos tiempos.
- Con respecto a las líneas de transporte público, se cambió el recorrido de la línea 10 (Paluncay) y se eliminó la línea 18 (Zhucay).
- Dado que ciertas calles están configuradas únicamente para la circulación del Tranvía se eliminó el centroide No. 51 (parqueadero), redistribuyendo a parqueaderos aledaños sus porcentajes de generación y atracción de tráfico.
- Con el fin de proyectar la matriz calibrada del año 2015 al año 2018, se determinó un factor de crecimiento, dado por la siguiente ecuación [24]:

$$\text{Factor crecimiento} = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (3.4)$$



donde:

r : Tasa de crecimiento/100

n : Número de años

- La tasa de crecimiento se obtuvo mediante el siguiente procedimiento:
 1. Se escogió el mismo número de días en una misma semana del mes de marzo, para diferentes años.
 2. Para esta semana se obtuvieron los volúmenes registrados en un período de 24h por la Central Semafórica, en las intersecciones del área de estudio.
 3. Al sumar los totales obtenidos en cada intersección, se obtuvo un total de vehículos al año.

Dado que se obtuvieron tasas que marcan un crecimiento en el período 2011-2012, y disminución entre el 2012 y los años siguientes hasta el 2015 [25], se seleccionó la tasa que indica crecimiento (caso más crítico), considerándose constante hasta el año 2015.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se dan a conocer los resultados y análisis de los mismos, primeramente de la demanda de tráfico, para la matrices origen- destino del año 2015 (matriz base y calibrada) y para la matriz proyectada para el año 2018. Posteriormente, se presenta el coeficiente de determinación (R^2) y la bondad de ajuste (GEH), que garantizan la correcta calibración del modelo. Además se presentan resultados de la simulación en 2D y 3D en el software Aimsun 8.1. Finalmente, se presentan los parámetros: capacidad, velocidad, nivel de servicio, tiempo de demora y flujo, obtenidos para un análisis de micro zonas y la zona de estudio completa, considerando 3 escenarios planteados para la presentación de resultados.

4.1 Demanda de tráfico

En función de la metodología indicada en el anterior capítulo, el modelo de micro simulación se realizó para el jueves 12 de marzo del 2015, para una hora de máxima demanda de 12h30 a 13h30.

Para la obtención de la matriz O-D para el año 2015, a partir de un VHMD de 29,154 vehículos se obtuvo un factor k de 0.089, que se asemeja al valor propuesto por Cal y Mayor (2006) para proyecciones en carreteras suburbanas, como es el caso de las vías que componen la presente área de estudio.

Del registro de datos de la Central Semafórica se obtuvo un total de 13 intersecciones coincidentes con las zonas de la matriz porcentual. Con esta muestra se obtuvo un volumen probable de 10,975 vehículos para 8 entradas y 10,815 vehículos para 5 salidas.

En función de dichos volúmenes probables, el volumen total de vehículos obtenido para el área de estudio es de 10,913 vehículos, cuyos parámetros estadísticos se muestran en la Tabla 4.1.



Tabla 4.1: *Parámetros estadísticos de la muestra obtenida.*

Parámetro	Valor
Desviación estándar	2,629
Nivel de confianza	95%
Error estándar	729
Margen de error	1,429
Intervalo de confianza	9,484 – 12,343

El margen de error obtenido puede deberse a la consideración anteriormente planteada de no considerar de la matriz O-D (UDA) la cantidad de vehículos que registraban entrada al Centro Histórico pero no salida, y viceversa.

La matriz O-D del año 2015 obtenida para la construcción del modelo de simulación se presenta en la Tabla 4.2. Las zonas de dicha matriz se presentaron en la Tabla 3.4 del capítulo anterior.

Posteriormente, para obtener la matriz O-D calibrada del año 2015, se implementaron 69 nuevos centroides, correspondientes a los parqueaderos existentes en el área de estudio. Dicha matriz fue calibrada en función de la metodología anteriormente descrita.

Finalmente, para la obtención de la matriz proyectada para el año 2018, se eliminó de la matriz calibrada el centroe 51, correspondiente al parqueadero ubicado en la calle Mariscal Lamar, entre Tarqui y Juan Montalvo. Los valores de dicho centroe se redistribuyeron a parqueaderos aledaños al mismo, en función de sus capacidades.

Además, para una tasa de crecimiento de 5.77% se obtuvo un factor de crecimiento (Eq.3.1) de 3.176. Este factor multiplicado por la matriz calibrada (con el centroe 51 redistribuido), constituye la matriz proyectada para el año 2018.

4.2 Modelo de micro simulación calibrado

Para la calibración del modelo se emplearon los detectores que se presentan en el Anexo 3.6. Además, con el fin de establecer una mejor dinámica de circulación se eliminó la señal reglamentaria de “Pare” de las siguientes intersecciones:

- Honorato Vásquez y Mariano Cueva
- Calle Larga y Mariano Cueva.
- Honorato Vásquez y Tomás Ordoñez.
- Calle Larga y Bajada de los Molinos.
- Calle Larga y Miguel Estrella

Tabla 4.2: Matriz O-D (2015) para construcción del modelo.

O/D	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24	Z25	Z26	Z27	Z28	Z29	Z30	Z31	Z32	Z33	Z34	Z35	Z36	Z37	Z38	Z39	Total entradas
Z1	9	12	2	7	4	7	5	5	4	3	2	1	4	5	2	7	6	7	10	1	104
Z2	90	74	28	68	35	54	32	38	34	21	18	27	25	38	33	112	37	87	81	7	937
Z3	133	89	94	194	110	131	86	101	73	49	41	58	69	121	44	84	66	193	233	17	1988
Z4	50	31	37	105	46	64	37	44	35	35	19	30	29	29	15	34	28	67	82	10	827
Z5	33	22	20	63	50	46	27	28	24	16	9	19	18	21	12	22	17	42	78	12	579
Z6	50	35	33	81	57	84	43	43	34	25	19	24	27	34	18	39	30	86	96	7	864
Z7	26	16	13	35	18	32	23	19	19	12	8	14	12	16	8	16	12	24	43	4	370
Z8	40	22	17	43	23	35	28	44	28	21	15	22	19	23	10	24	20	35	51	4	525
Z9	38	25	18	51	28	44	30	54	40	19	14	21	16	20	10	26	18	45	56	4	577
Z10	29	18	15	47	24	29	24	37	31	45	16	18	16	22	9	26	17	32	51	5	512
Z11	23	14	13	39	16	22	15	24	16	16	16	18	14	15	6	13	13	25	33	3	355
Z12	22	11	16	25	12	18	11	16	9	7	7	18	12	12	7	14	11	17	27	2	271
Z13	26	14	19	28	16	22	14	17	13	10	6	15	21	20	8	16	14	26	30	3	340
Z14	40	16	14	36	18	27	17	19	14	12	9	12	18	24	15	23	16	44	40	3	417
Z15	44	20	11	24	13	15	15	14	11	8	8	8	9	15	15	28	15	36	31	2	343
Z16	64	16	9	20	12	17	14	16	12	8	7	10	9	14	9	36	18	23	28	2	344
Z17	50	34	21	48	22	35	25	38	23	16	13	18	21	25	17	53	33	43	52	4	591
Z18	47	28	21	68	37	46	33	35	34	20	13	24	22	30	15	33	22	51	268	9	856
Z19	5	5	4	10	5	7	4	6	6	3	3	4	2	4	2	5	3	7	24	5	114
Total	819	502	405	993	545	733	485	599	459	346	243	363	365	490	255	608	397	890	1315	104	10913

Tras cinco replicaciones y los cambios mencionados anteriormente se calibró el modelo, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98, cuya recta de regresión lineal se presenta en la Figura 4.1. También se presenta un gráfico de línea (Figura 4.2), que muestra una gran correlación entre el flujo simulado y el flujo real en cada uno de los detectores.

Para los 45 detectores se obtuvo que el 100% tiene un GEH<5, lo que indica que el modelo está correctamente calibrado, según los criterios planteados en la sección 2.7.2.6 [16]. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

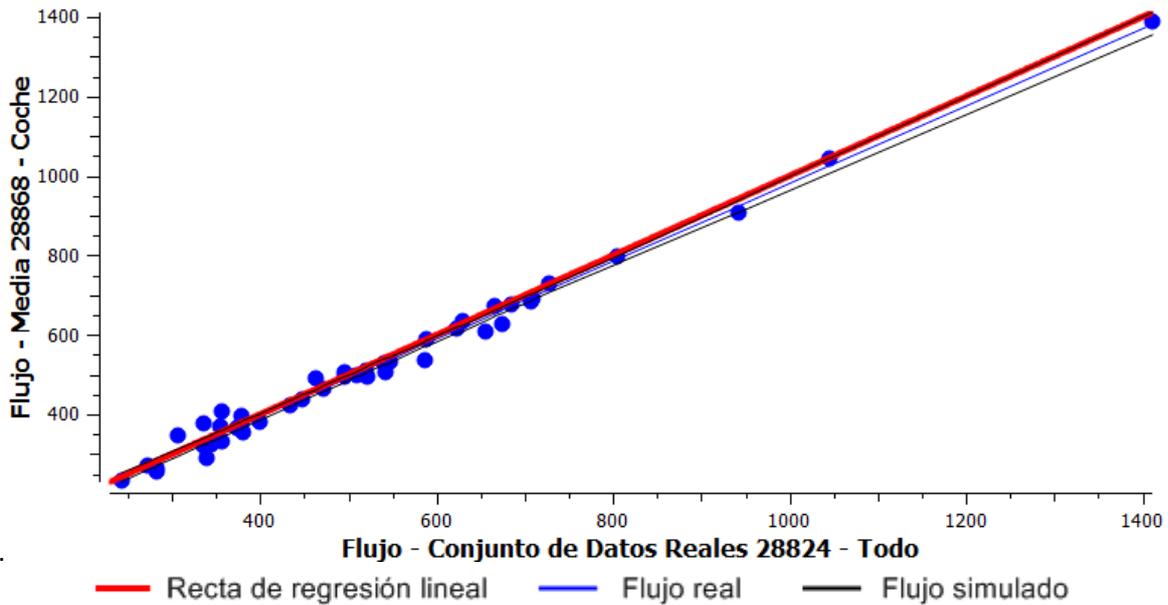


Fig.4.1: Gráfica de regresión del flujo real vs flujo simulado [26].

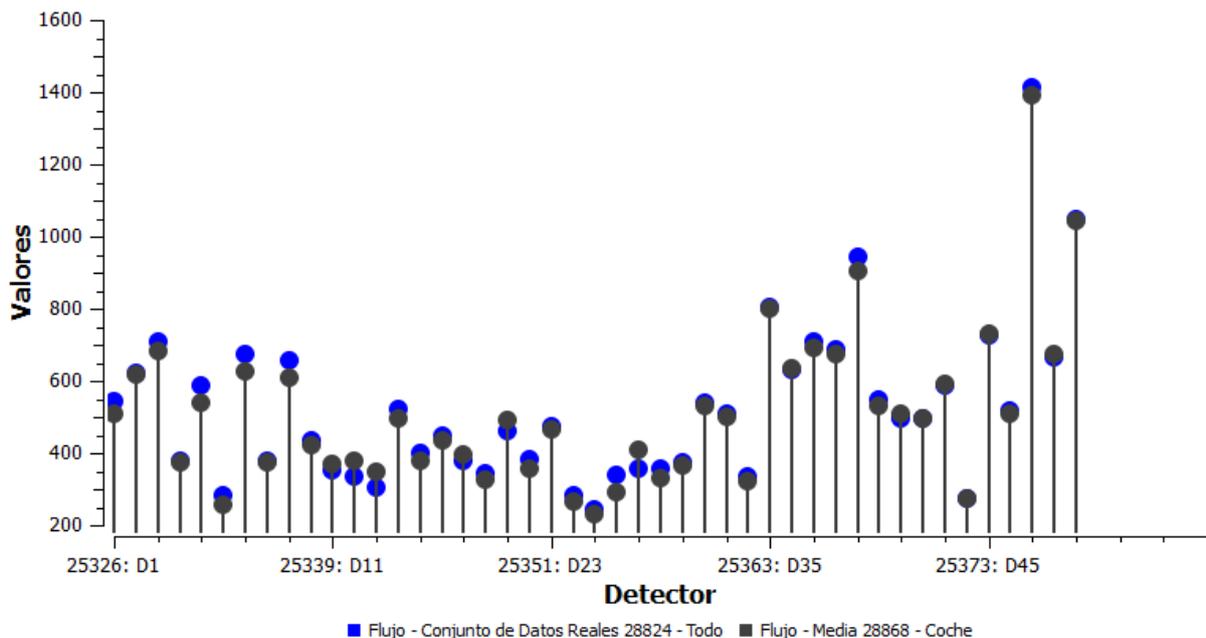


Fig.4.2: Gráfica de línea del flujo real vs flujo simulado [26].

Tabla 4.3: GEH en los detectores implementados en el área de estudio [26].

Detector No.	Flujo real	Flujo simulado	Diferencia Relativa (%)	GEH	Detector No.	Flujo real	Flujo simulado	Diferencia Relativa (%)	GEH
1	542	507.6	-6.35	1.50	26	339	289.2	-14.69	2.81
2	623	617	-0.96	0.24	27	356	409	14.89	2.71
3	707	683	-3.39	0.91	28	356	330.8	-7.08	1.36
4	379	373.2	-1.53	0.30	29	373	364.2	-2.36	0.46
5	587	537.6	-8.42	2.08	30	541	528.6	-2.29	0.54
6	282	257.8	-8.58	1.47	33	509	498.8	-2.00	0.45
7	675	628.2	-6.93	1.83	34	336	320.6	-4.58	0.85
8	379	372.2	-1.79	0.35	35	804	798.2	-0.72	0.20
9	656	607.6	-7.38	1.93	36	629	633.4	0.70	0.18
10	433	422.6	-2.40	0.50	37	709	689.6	-2.74	0.73
11	354	370.6	4.69	0.87	38	685	675.8	-1.34	0.35
12	336	378.4	12.62	2.24	39	942	906	-3.82	1.18
14	306	346.4	13.20	2.24	40	547	532.6	-2.63	0.62
15	522	495.2	-5.13	1.19	41	495	506.6	2.34	0.52
16	400	380	-5.00	1.01	42	496	495.4	-0.12	0.03
18	448	436	-2.68	0.57	43	588	589.6	0.27	0.07
19	378	395.6	4.66	0.89	44	273	272.2	-0.29	0.05
20	345	325	-5.80	1.09	45	728	730	0.27	0.07
21	463	491.8	6.22	1.32	46	519	508.8	-1.97	0.45
22	381	356.2	-6.51	1.29	47	1411	1389.8	-1.50	0.57
23	472	465.4	-1.40	0.30	48	665	672.4	1.11	0.29
24	283	264.2	-6.64	1.14	49	1046	1043	-0.29	0.09
25	243	231.6	-4.69	0.74	Media	523.13	513.95	-1.76	0.90

Un coeficiente R^2 de 0.98 y un GEH medio de 0.90, garantizan la validez del modelo, al compararlo con otros modelos calibrados aplicados en la ciudad de Cuenca en determinados estudios de tránsito [9], [23].

Por otro lado, en las Figuras 4.3 y 4.4 se puede observar parte de la simulación en 2D y 3D respectivamente, obtenida con el modelo calibrado para la intersección Presidente Córdova y Antonio Borrero.

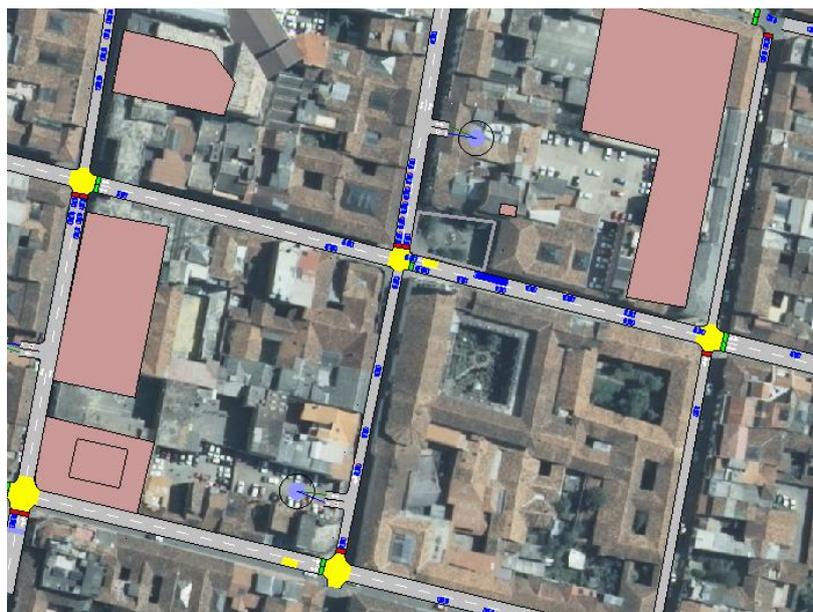


Fig.4.3: Simulación 2D con el software Aimsun 8.1.



Fig.4.4: Simulación 3D con el software Aimsun 8.1.

4.3 Análisis de escenarios

Para el análisis y presentación de resultados se plantean 3 escenarios:

- **Escenario 1:** Dinámica de circulación vehicular en el Centro Histórico, en el año 2015.
- **Escenario 2:** Dinámica de circulación vehicular en el año 2018, sin la implementación de las velocidades límite propuestas por el P MEP.
- **Escenario 3:** Dinámica de circulación vehicular en el año 2018, con la implementación de velocidades límites propuestas por el P MEP.

4.3.1 Análisis de micro zonas

Para fines prácticos y de mayor comprensión se presentan parte de los resultados, enfocados en las micro zonas que se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6. Entiéndase por micro zona a una parte de la zona de estudio.

Cabe recalcar que las celdas de las tablas que no tienen valores corresponden a vías que forman parte de la ruta del tranvía.



Fig.4.5: Delimitación de la Micro zona 1 para análisis.



Fig.4.6: Delimitación de la Micro zona 2 para análisis.



4.3.1.1 Capacidad

Para la obtención de capacidades en las vías del área de estudio, se establecieron dos rangos:

- a: >500 – 1,000 vehículos/hora
- b: >1,000 – 2,000 vehículos/ hora

A partir del establecimiento de dichos rangos, en la Figura 4.7 se presentan las capacidades de las vías en las micro zonas.

Como se puede observar la capacidad en la mayoría de las vías de la micro zona 1 se mantiene en los 3 escenarios propuestos, dado que el tipo de vía no cambia con el tiempo. Sin embargo, se puede observar que las vías de la Gran Colombia disminuyen su capacidad para el año 2018, dado que la ruta del tranvía sigue este corredor vial, implicando una reducción del número y ancho de carriles.

De igual forma para el caso de la micro zona 2, las vías ubicadas en la Gran Colombia y Mariscal Lamar disminuyen su capacidad, al ser parte de la ruta del tranvía “4 Ríos”.

4.3.1.2 Velocidad de operación

La velocidad de operación, referida como la que adoptan realmente los conductores al circular por las vías, corresponde a la velocidad simulada en el modelo. Las velocidades obtenidas en las micro zonas se presentan en las Tablas 4.4 y 4.5.

Como se puede observar en la micro zona 1, existe un porcentaje similar en el aumento y disminución de velocidades al comparar los escenarios 1 y 2. Dicha similitud se debe a una posible redistribución en la dinámica de circulación vehicular por la implementación del tranvía y los cambios que este implica en las vías por las que circula. Por otro lado, la baja velocidad de operación en algunas vías, con respecto a su velocidad de diseño, puede deberse a una mayor congestión vehicular, dado que la zona del “Parque Calderón” representa uno de los lugares de mayor atracción de viajes.

En tanto que, con las velocidades de operación obtenidas en el escenario 3, se puede observar el cumplimiento de los objetivos del PMEP [5], al establecer menores velocidades en esta zona.

Micro zona 1

Micro zona 2

a)



b)



c)



Capacidad (veh/hora)

— Capacidad >500-1000 — Capacidad >1000-2000

Fig.4.7: Niveles de servicio obtenidos: a) Escenario 1; b) Escenario 2; c) Escenario 3.

Tabla 4.4: Velocidad simulada en vías de la micro zona 1.

Calle	Entre	Velocidad (m/s)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Padre Aguirre	G.Colombia y S.Bolívar	18	20	7
	S.Bolívar y M.Sucre	22	20	9
	M.Sucre y Pte Córdova	30	30	9
Benigno Malo	G.Colombia y S.Bolívar	20	26	9
	S.Bolívar y M.Sucre	18	27	9
	M.Sucre y Pte Córdova	27	28	6
Luis Cordero	G.Colombia y S.Bolívar	30	29	9
	S.Bolívar y M.Sucre	27	25	6
	M.Sucre y Pte Córdova	13	11	9
Antonio Borrero	G.Colombia y S.Bolívar	28	30	8
	S.Bolívar y M.Sucre	26	24	7
	M.Sucre y Pte Córdova	23	21	10
Gran Colombia	P.Aguirre y B.Malo	22	30	13
	B.Malo y L.Cordero	20	15	12
	L.Cordero y A.Borrero	30	28	19
Simón Bolívar	P.Aguirre y B.Malo	37	16	8
	B.Malo y L.Cordero	32	13	No circulan
	L.Cordero y A.Borrero	48	39	6
Mariscal Sucre	P.Aguirre y B.Malo	21	30	8
	B.Malo y L.Cordero	25	28	9
	L.Cordero y A.Borrero	29	28	11
Presidente Córdova	P.Aguirre y B.Malo	24	27	15
	B.Malo y L.Cordero	20	26	19
	L.Cordero y A.Borrero	19	23	19

Tabla 4.5: Velocidad simulada en vías de la micro zona 2.

Calle	Entre	Velocidad (m/s)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Coronel Tálbot	G.Sangurima y M.Lamar	29	31	21
	M.Lamar y G.Colombia	21	32	21
	G.Colombia y S.Bolívar	10	14	14
Estévez de Toral	G.Sangurima y M.Lamar	20	21	17
	M.Lamar y G.Colombia	25	32	22
	G.Colombia y S.Bolívar	19	21	17
Juan Montalvo	G.Sangurima y M.Lamar	26	31	31
	M.Lamar y G.Colombia	20	20	24
	G.Colombia y S.Bolívar	23	25	25

Continuación Tabla 4.5

Tarqui	G.Sangurima y M.Lamar	25	18	6
	M.Lamar y G.Colombia	16	25	3
	G.Colombia y S.Bolívar	18	23	5
Gaspar Sangurima	C.Talbot y E.Toral	23	19	16
	E.Toral y J.Montalvo	18	21	21
	J.Montalvo y Tarqui	26	26	20
Mariscal Lamar	C.Talbot y E.Toral	48	29	22
	E.Toral y J.Montalvo	48	-	-
	J.Montalvo y Tarqui	44	-	-
Gran Colombia	C.Talbot y E.Toral	32	-	-
	E.Toral y J.Montalvo	24	18	13
	J.Montalvo y Tarqui	25	23	16
Simón Bolívar	C.Talbot y E.Toral	38	38	19
	E.Toral y J.Montalvo	44	41	21
	J.Montalvo y Tarqui	37	21	7

Para el caso de la micro zona 2, se observan comportamientos similares a los de la micro zona 1, al comparar los escenarios 1 y 2. Una de las principales variaciones en la velocidad de operación con respecto a la velocidad de diseño se presenta en la calle Coronel Tálbot, entre Gran Colombia y Simón Bolívar, misma que puede deberse a que en la calle anterior se encuentra el mercado “3 de Noviembre”, y que al ser una calle secundaria debe dar preferencia al flujo circulante por la calle Simón Bolívar, que representa uno de los corredores con mayor velocidad de circulación en la zona.

Además en esta micro zona se observa vías que no registraron velocidad de operación en los escenarios 2 y 3, dado que existen carriles de uso exclusivo del tranvía. Por otro lado, se observa que las velocidades planteadas en el PMEP se cumplen, excepto para la calle Tarqui, la cual registra bajas velocidades de circulación. Esto puede deberse que al ser un corredor de mayor velocidad, todos los vehículos quieren tomarlo como ruta de circulación hacia sus destinos.

4.3.1.3 Nivel de servicio y tiempo de demora

Los niveles de servicio de las micro zonas 1 y 2 se presentan en la Figura 4.8. Dichos niveles se obtuvieron en función de los tiempos de demora que se presentan en las Tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6: Tiempo de demora obtenido en vías de la micro zona 1.

Calle	Entre	Tiempo de demora (segundos)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Padre Aguirre	G.Colombia y S.Bolívar	22	20	32
	S.Bolívar y M.Sucre	31	22	20
	M.Sucre y Pte Córdova	6	5	30
Benigno Malo	G.Colombia y S.Bolívar	26	13	36
	S.Bolívar y M.Sucre	18	15	23
	M.Sucre y Pte Córdova	4	9	57
Luis Cordero	G.Colombia y S.Bolívar	5	4	13
	S.Bolívar y M.Sucre	9	7	40
	M.Sucre y Pte Córdova	42	46	14
Antonio Borrero	G.Colombia y S.Bolívar	4	4	29
	S.Bolívar y M.Sucre	10	16	38
	M.Sucre y Pte Córdova	28	38	29
Gran Colombia	P.Aguirre y B.Malo	21	5	37
	B.Malo y L.Cordero	21	27	26
	L.Cordero y A.Borrero	5	6	9
Simón Bolívar	P.Aguirre y B.Malo	12	37	19
	B.Malo y L.Cordero	17	55	-
	L.Cordero y A.Borrero	1	16	52
Mariscal Sucre	P.Aguirre y B.Malo	15	4	20
	B.Malo y L.Cordero	12	9	12
	L.Cordero y A.Borrero	9	16	22
Presidente Córdova	P.Aguirre y B.Malo	13	10	31
	B.Malo y L.Cordero	18	11	22
	L.Cordero y A.Borrero	25	17	25

Tabla 4.7: Tiempo de demora obtenido en vías de la micro zona 2.

Calle	Entre	Tiempo de demora (segundos)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Coronel Tálbot	G.Sangurima y M.Lamar	7	7	10
	M.Lamar y G.Colombia	10	9	10
	G.Colombia y S.Bolívar	32	21	12
Estévez de Toral	G.Sangurima y M.Lamar	20	20	12
	M.Lamar y G.Colombia	8	5	8
	G.Colombia y S.Bolívar	12	6	5

Continuación Tabla 4.7

Juan Montalvo	G.Sangurima y M.Lamar	4	3	2
	M.Lamar y G.Colombia	23	21	19
	G.Colombia y S.Bolívar	14	14	11
Tarqui	G.Sangurima y M.Lamar	12	29	144
	M.Lamar y G.Colombia	29	16	169
	G.Colombia y S.Bolívar	29	19	131
Gaspar Sangurima	C.Tálbot y E.Toral	20	26	38
	E.Toral y J.Montalvo	30	24	23
	J.Montalvo y Tarqui	9	10	18
Mariscal Lamar	C.Tálbot y E.Toral	1	2	10
	E.Toral y J.Montalvo	1	-	-
	J.Montalvo y Tarqui	1	-	-
Gran Colombia	C.Talbot y E.Toral	9	-	-
	E.Toral y J.Montalvo	29	26	26
	J.Montalvo y Tarqui	14	20	23
Simón Bolívar	C.Tálbot y E.Toral	5	5	3
	E.Toral y J.Montalvo	2	3	8
	J.Montalvo y Tarqui	14	28	40

Como se puede observar, no existe una reducción considerable entre los niveles de servicio del escenario 1 y 2, sin embargo ambos varían en 12% aproximadamente, con respecto al escenario 3. Las principales variaciones corresponden a las calles: Benigno Malo entre Sucre y Presidente Córdova, Luis Cordero entre Bolívar y Sucre, y Bolívar entre Benigno Malo y Luis Cordero.

En el primer caso la variación significativa en el nivel de servicio, se debe a que los usuarios eligen salir del Centro Histórico (con rumbo oeste), considerando como ruta de evacuación la calle Presidente Córdova que tiene una mayor velocidad de circulación. Para el segundo caso, la vía Luis Cordero oferta una mayor capacidad con respecto a calles paralelas en el mismo sentido y ubicadas en la zona oeste, dado que dichas calles fueron afectadas por la jerarquización de vías en función de velocidades límite y la implantación del tranvía [1]. Finalmente, en el tercer caso, al tener la vía un nivel de servicio "E" y una menor velocidad de circulación, genera molestias en los usuarios, obligándolos a buscar otras rutas por calles aledañas.

Micro zona 1

Micro zona 2



Fig.4.8: Niveles de servicio obtenidos: a) Escenario 1; b) Escenario 2; c) Escenario 3.

Por otro lado, al analizar los resultados obtenidos en la micro zona 2, se puede establecer al igual que en la micro zona 1, que no existe una variación considerable en los escenarios 1 y 2, sin embargo ambos varían en un 25% aproximadamente con respecto al tercer escenario. Los casos más representativos en este caso, se presentan en las calles: Coronel Tálbot entre Gran Colombia y Bolívar, el corredor de la calle Tarqui, y la Bolívar ente Juan Montalvo y Tarqui. El primer caso muestra que existe un mejoramiento en el nivel de servicio, que puede deberse a que los únicos vehículos que pueden ingresar a esta calle son los que vienen por la Coronel Tálbot entre Lamar y Gran Colombia, mas no los que vienen por la calle Gran Colombia entre Miguel Vélez y Coronel Tálbot, que ahora representa una calle con carril para circulación exclusiva del tranvía. En tanto que, para el segundo y tercer caso se observa una disminución en los niveles de servicio, dado que se excede la capacidad de estas vías, al representar nuevas rutas de circulación y evacuación hacia destinos determinados.

4.3.1.4 Flujo

El flujo es otro de los parámetros de importante determinación para definir el comportamiento del tránsito en el área de estudio. Los flujos obtenidos en las micro zonas se presentan en las Tablas 4.8 y 4.9.

Tabla 4.8: Flujo obtenido en vías de la micro zona 1.

Calle	Entre	Flujo (vehículos/hora)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Padre Aguirre	G.Colombia y S.Bolívar	376	451	91
	S.Bolívar y M.Sucre	353	509	65
	M.Sucre y Pte Córdova	270	287	73
Benigno Malo	G.Colombia y S.Bolívar	343	277	169
	S.Bolívar y M.Sucre	569	76	144
	M.Sucre y Pte Córdova	444	16	106
Luis Cordero	G.Colombia y S.Bolívar	196	163	14
	S.Bolívar y M.Sucre	371	386	11
	M.Sucre y Pte Córdova	413	306	32
Antonio Borrero	G.Colombia y S.Bolívar	275	434	365
	S.Bolívar y M.Sucre	331	557	379
	M.Sucre y Pte Córdova	381	664	221
Gran Colombia	P.Aguirre y B.Malo	500	92	50
	B.Malo y L.Cordero	502	294	161
	L.Cordero y A.Borrero	448	290	162

Continuación Tabla 4.8

Simón Bolívar	P.Aguirre y B.Malo	478	866	31
	B.Malo y L.Cordero	698	697	No circulan
	L.Cordero y A.Borrero	540	527	4
Mariscal Sucre	P.Aguirre y B.Malo	353	419	38
	B.Malo y L.Cordero	476	468	85
	L.Cordero y A.Borrero	513	394	108
Presidente Córdova	P.Aguirre y B.Malo	640	569	1138
	B.Malo y L.Cordero	912	932	1415
	L.Cordero y A.Borrero	898	1090	1312

Tabla 4.9: Flujo obtenido en vías de la micro zona 2.

Calle	Entre	Flujo (vehículos/hora)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Coronel Tálbot	G.Sangurima y M.Lamar	283	282	334
	M.Lamar y G.Colombia	602	276	329
	G.Colombia y S.Bolívar	541	282	341
Estévez de Toral	G.Sangurima y M.Lamar	366	236	139
	M.Lamar y G.Colombia	349	253	159
	G.Colombia y S.Bolívar	313	259	161
Juan Montalvo	G.Sangurima y M.Lamar	294	368	404
	M.Lamar y G.Colombia	289	339	382
	G.Colombia y S.Bolívar	245	293	345
Tarqui	G.Sangurima y M.Lamar	509	469	518
	M.Lamar y G.Colombia	644	308	509
	G.Colombia y S.Bolívar	474	295	528
Gaspar Sangurima	C.Tálbot y E.Toral	280	583	710
	E.Toral y J.Montalvo	434	634	671
	J.Montalvo y Tarqui	436	517	486
Mariscal Lamar	C.Tálbot y E.Toral	569	14	10
	E.Toral y J.Montalvo	580	-	-
	J.Montalvo y Tarqui	641	-	-
Gran Colombia	C.Tálbot y E.Toral	468	-	-
	E.Toral y J.Montalvo	443	41	41
	J.Montalvo y Tarqui	492	50	47
Simón Bolívar	C.Tálbot y E.Toral	331	677	288
	E.Toral y J.Montalvo	342	875	386
	J.Montalvo y Tarqui	430	896	325



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Al comparar los distintos escenarios de la micro zona 1, se puede observar que existe una reducción del flujo del escenario 1 al 2, 1 al 3 y 2 al 3. Dicha reducción se debe al crecimiento del parque automotor de un año a otro, mismo que implica mayor cantidad de vehículos en las vías y mayores tiempos de demora. Además, dado que algunas calles ya se encuentran saturadas y tienen grandes colas de vehículos, provocan que los usuarios tomen nuevas rutas.

Al igual que en la micro zona 1, se observa una reducción de flujo en la micro zona 2, con una variación de 2,408 veh/hora entre los escenarios 1-2, y 3,242 veh/hora entre los escenarios 1-3. Dicha reducción se debe a que el comportamiento del tráfico en vías aledañas (afectadas por el tranvía o saturadas), genera un menor ingreso de vehículos a la micro zona. Por otro lado, la reducción de flujo entre el escenario 2-3 (824 veh/hora) se debe a que los usuarios optan por evitar en sus recorridos la calle Simón Bolívar entre Benigno Malo y Luis Cordero, dada su baja velocidad de circulación propuesta [1], utilizando vías paralelas como la Presidente Córdova.

4.3.2 Análisis de la zona de estudio completa

Los resultados de los parámetros de tráfico: nivel de servicio, tiempo de demora, velocidad y flujo para toda el área de estudio se presentan como Anexos 4.1 y 4.2. Al igual que en el análisis de micro zonas, las celdas de las tablas que no tienen valores corresponden a vías que forman parte de la ruta del tranvía o no poseen circulación vehicular.

Se presenta también un mapa con las capacidades de las vías del área de estudio para los escenarios planteados (Anexo 4.3).

4.3.2.1 Nivel de servicio

En las Figuras 4.9 a 4.11 se presentan diagramas de porcentajes de los niveles de servicio en el área de estudio en general, para los 3 escenarios planteados. Además, en el Anexo 4.4 se presentan mapas con los niveles de servicio de todas las vías del área de estudio, para los 3 escenarios.

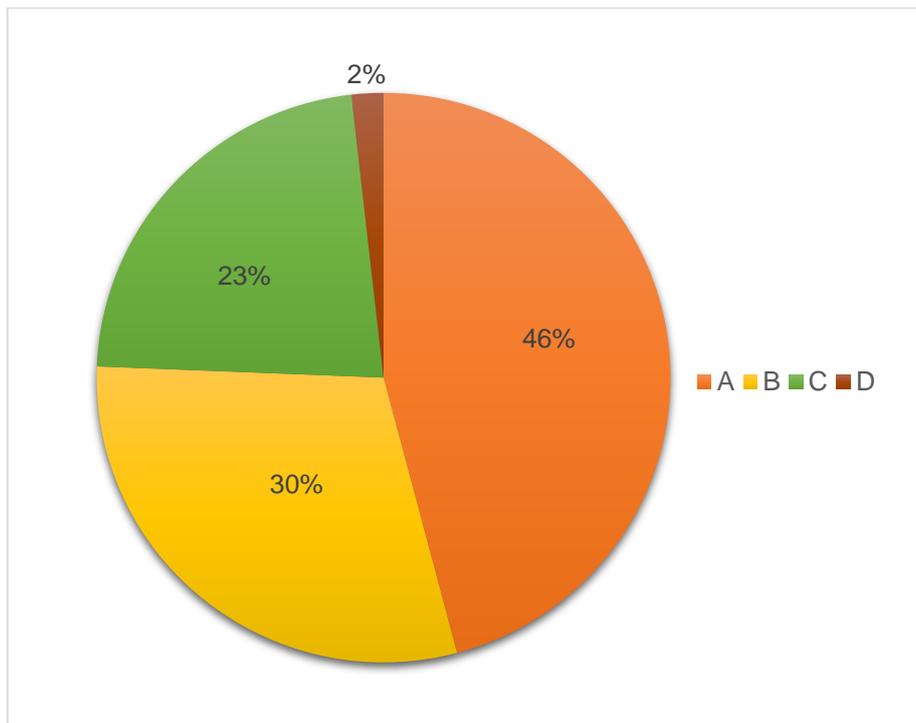


Fig.4.9: Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 1).

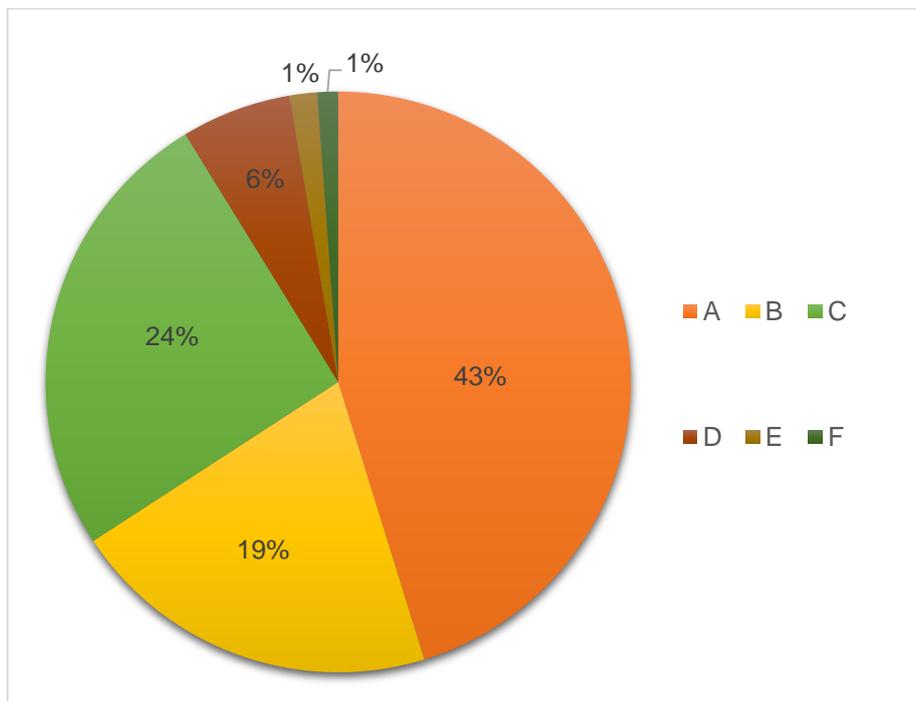


Fig.4.10: Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 2).

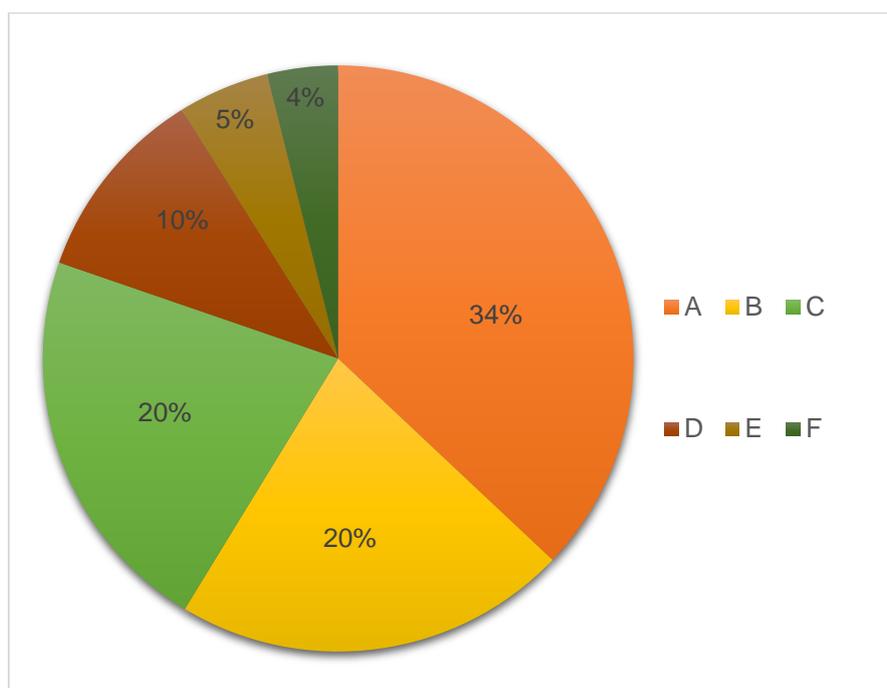


Fig.4.11: Porcentaje de niveles de servicio en el área de estudio (Escenario 3).

Como se puede observar en los diagramas, en el año 2015 el 46% de las vías tenían un buen nivel de servicio (A), pero tras el aumento del volumen vehicular y las acciones propuestas por PMEP dicho porcentaje disminuye a un 34% para el año 2018. Además, tras la implementación del tranvía, el 1% de vías tornaron su circulación inestable con niveles de servicio E y F, y tras la jerarquización de vías en función de velocidades límite dichos porcentajes aumentaron a un 5 y 4% respectivamente. Dicho aumento para el año 2018 se debe a la redistribución en la dinámica de circulación vehicular, producida por los cambios que implica la implementación del tranvía en las vías, obligando a los usuarios a buscar nuevas rutas que incluyan calles con mayores velocidades de circulación. Pero dichas calles pueden estar funcionando ya al límite de su capacidad, generándoles una sobre saturación y tiempos de demora excesivos.

Este hecho puede corroborarse con los resultados obtenidos de otro estudio que comprende el análisis de niveles de servicio tras la implementación del tranvía [27], donde en determinadas intersecciones del Centro Histórico los niveles de servicio en las intersecciones serán F.

4.3.2.2 Parámetros temporales

En la Tabla 4.10 se presentan una serie de parámetros temporales obtenidos con el modelo de simulación, mismos que sirven para establecer comparaciones entre los distintos escenarios.

Tabla 4.10: Parámetros temporales en los escenarios planteados [26].

Serie Temporal	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Unidades
	Valor	Desviación Estándar	Valor	Desviación Estándar	Valor	Desviación Estándar	
Cola Media	551.74	15.66	1519.15	211.21	2351.71	30.18	veh
Densidad	15.81	0.21	30.78	2.81	42.83	0.52	veh/km
Giros Perdidos	53.60	11.76	73.20	11.43	275.00	15.98	-
Tiempo de Demora	153.91	3.76	300.35	19.30	381.75	37.59	s/km
Vehículos Esperando para Entrar	37.60	51.72	3755.40	1096.36	7764.80	164.40	veh
Velocidad	15.89	0.14	13.28	0.37	12.52	0.25	km/h

Se puede observar como estos parámetros están ligados, dado que un aumento en la densidad, producirá mayores colas, giros perdidos, tiempos de demora y reducirá las velocidades de circulación. El aumento de la cola media en un 63 y 73% en los escenarios 2 y 3, con respecto al escenario 1, se debe al aumento de la demanda en determinadas calles que ya se encuentran congestionadas y con niveles de servicio E y F. Consecuentemente, esto produce al aumento de giros perdidos de 53 a 275 y la cantidad de vehículos que esperan entrar al Centro Histórico o aquellos que quieren incorporarse al tráfico tras salir de los parqueaderos localizados en el área de estudio.

4.3.2.3 Efecto del tranvía sobre el tráfico de la zona

Como se puede observar con los resultados del modelo de simulación múltiples son los efectos del proyecto actual del tranvía. Este afecta al tráfico del centro de la ciudad, implicando la formación de atascos y acumulación de vehículos, como sucedió con el tranvía implementado en Zaragoza, según un estudio de los tranvías de España [28]. Por otro lado, para lograr el objetivo de la implantación del tranvía, se deberían realizar y proponer nuevas alternativas para la circulación del tráfico, como es el caso de la región Llobregat, Barcelona, España, en donde se han implementado la apertura de nuevos itinerarios para desvío del tráfico [29].



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras el desarrollo del presente trabajo de titulación en todas sus etapas, se pueden establecer las conclusiones y recomendaciones que se presentan a continuación.

5.1 Conclusiones

Se obtuvo un coeficiente de regresión lineal de 0.98 y un GEH medio de 0.90, que garantizan la correcta calibración del modelo y representan un indicador de la fiabilidad de los resultados que describen el comportamiento vehicular de la zona de estudio. Además, esto nos indica que la información estática y dinámica, recolectada en campo y brindada por el Municipio de Cuenca, fue de la calidad suficiente para obtener un modelo que simule correctamente la realidad.

Un parámetro fundamental en la calibración del modelo para el año 2015 fue la inclusión de zonas de parqueo, dado que estas proliferan hoy en día en el Centro Histórico, generando y atrayendo viajes, que influyen en la dinámica de circulación. Por ende, debe analizarse también el tratamiento que se les dará a los mismos cuando empiece a funcionar el tranvía. Lo ideal, acorde a las propuestas del PMEP, sería reemplazar todos ellos por parqueaderos de capacidad alta, ubicados en los bordes del Centro Histórico.

Se determinó que los planes de control semafórico son muy determinantes en la dinámica de circulación, ya que un semáforo con tiempos mal ajustados puede generar una gran congestión. Por ende con la implementación y funcionamiento del tranvía se debe aplicar un plan estratégico en el tiempo de los semáforos, de manera que se garantice seguridad y una movilidad sostenible. Esto puede ser sujeto a un escenario de simulación para futuros estudios del tráfico en la zona.

Se observó que con la implementación del tranvía y las velocidades límite, existe una redistribución en la dinámica de circulación vehicular del centro de la ciudad, la cual trae consigo dos aspectos importantes. El primero es que los nuevos corredores que escogen los usuarios para realizar sus viajes, dado que brindan mayores velocidades de circulación, no tienen la capacidad para albergar una adición de vehículos, por lo que las vías se saturan, aumentando los tiempos de demora en un 60% y reduciendo su nivel de servicio de B a E o



F. Dentro de estos corredores están: la calle Gaspar Sangurima, Presidente Córdova, Tarqui y Calle Larga. Por otro lado, el segundo aspecto hace referencia al mejoramiento de niveles de servicio en algunas calles, dado que los corredores mencionados se congestionan, producen un impedimento para que vehículos puedan ingresar al núcleo del Centro Histórico.

Al analizar los escenarios planteados en la obtención de resultados, se observa que para el año 2018, existen aproximadamente 7,764 vehículos que no entran al Centro Histórico y no pueden llegar a sus destinos, ya sea por colas excesivas, niveles de servicio inestables, entre otros. Todos éstos son aspectos que incidirán en el confort y seguridad de los usuarios, y el desempeño de la infraestructura de transporte.

Otro punto importante que cabe mencionar, es que al reducir los carriles para vehículos de dos a uno, los servicios sanitarios y bomberos tendrán dificultades para llegar a subsanar urgencias y a los hospitales de emergencia, si estos se encuentran ubicados en el Centro Histórico.

Se puede verificar el cumplimiento de uno de los objetivos del PMEP con la implementación de velocidades límite, dado que disminuye la cantidad de vehículos que circulan por ciertas calles del Centro Histórico, recuperándose el espacio público para la circulación de peatones y otros medios de transporte no motorizados, desincentivando el uso del vehículo privado y promoviendo la movilización en el transporte público. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los vehículos que dejan de circular por estas calles buscan nuevas rutas para llegar a su destino por calles aledañas.

Al interpretar los resultados obtenidos, se debe considerar que el modelo al realizar la micro simulación considera ciertas regulaciones y condiciones de circulación estrictamente, caso que en nuestro medio no siempre se cumple. Pese a estas limitaciones, el modelo calibrado sirve como base para el análisis e implementación de futuros estudios de tránsito.

5.2 Recomendaciones

Se tomaron como válidos los resultados arrojados por la micro simulación para el año 2018. Sin embargo, se recomienda que con el fin de representar de manera más aproximada la realidad se realice una validación del modelo en este año, realizando aforos vehiculares en las intersecciones más representativas del área de estudio, determinadas mediante un análisis previo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se recomienda que conjuntamente con la implementación del tranvía se tomen medidas para promover nuevas rutas y modos de transporte público seguro, a fin de no afectar el confort de los usuarios y el desempeño de la infraestructura de transporte.

En el caso específico de la actual área de estudio, se podría recomendar el análisis de tráfico sin vehículos de transporte público, desplazándolos tal vez a las calles límites del Centro Histórico, de manera que fluya un poco más la dinámica de circulación interna.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] GADMCC, “Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025,” 2015.
- [2] J. Flores and B. Carrillo, “Primer avance del proyecto de aforo de registro de placas en el Centro Histórico del área urbana de Cuenca,” Cuenca, 2015.
- [3] J. Flores, “Segundo avance del proyecto en encuestas en el Centro Histórico de Cuenca,” Cuenca, 2015.
- [4] GADMCC, “Una diagnosis en 9 puntos para el Centro Histórico,” Cuenca, 2016.
- [5] GADMCC, “Plan Especial del Centro Histórico de Cuenca,” Cuenca, 2011.
- [6] R. Cal, Rafael y Mayor, *Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones*, 8th ed. Alfaomega, 2006.
- [7] J. Cueva Sempertegui, “Síntesis de intersecciones, señalización y semáforos (Análisis de medidas para reducir la congestión),” Universidad de Cuenca, 2012.
- [8] A. Baeza and R. E. Martínez, “Metodología para el Análisis de Capacidad y Nivel de Servicio en Intersecciones Semaforizadas de acuerdo al Manual de Capacidad HCM 2000: Caso Cerro del Agua/Ingeniería,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [9] C. F. Granda and I. P. Martínez, “Análisis de tráfico en las principales intersecciones del área de influencia de la Universidad del Azuay,” Universidad del Azuay, 2017.
- [10] HCM, *Highway Capacity Manual*. United States of America: Transportation Research Board, 2000.
- [11] J. de D. Ortúzar, *Modelos de demanda de transporte*, Segunda. 2015.
- [12] J. Olstam and A. Tapani, “A review of guidelines for applying traffic simulation to level of service analysis,” *Procedia Soc. Behav. Sci.*, 2011.
- [13] Austroads, “The use and application of microsimulation traffic models,” Sydney, 2006.
- [14] D. A. Jiménez, “Uso de técnicas estadísticas para la construcción de funciones objetivos en el proceso de calibración de modelos de simulación de tráfico,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.
- [15] R. Balakrishna, C. Antoniou, M. Ben-akiva, H. N. Koutsopoulos, and Y. Wen, “Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models,” pp. 198–207, 2007.
- [16] S. D. Gleave and Transconsult, “Modelación de demanda para carreteras de Cuota,” México, 2006.



- [17] H. Xiao, R. Ambadipudi, J. Hourdakanis, and P. Michalopoulos, "Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM," 2005.
- [18] C. Moyano Tobar, "Guía de uso de Aimsun 8.02 para análisis microscópico, mesoscópico, híbrido y macroscópico," Universidad del Azuay, 2014.
- [19] J. Martínez Gavilanes and O. Delgado Inga, "Compatibilidad de placas y encuestas de origen-destino en el Plan de Movilidad y Espacios Públicos del Cantón Cuenca," vol. 69, p. 338, 2016.
- [20] B. Mccann, "A review of SCATS operation and deployment in Dublin," *Dublin City Counc.*, 2014.
- [21] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Third. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [22] NEVI-12, *Normas para estudios y diseño viales*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2012, p. 382.
- [23] C. Moyano Tobar, "Estimación de la contaminación de aire generada por efecto de la circulación vehicular motorizada en la Av.10 de Agosto de la ciudad de Cuenca-Ecuador, usando la herramienta de micro simulación de tránsito Aimsun 8.1.," Universidad del Azuay, 2017.
- [24] The Asphalt Institute, *AI MSI-1: Thickness Design-Full Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets*, vol. 552. 1970.
- [25] P. K. Berrezueta, "Determinación de índices de tráfico motorizado en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca," Universidad del Azuay, 2016.
- [26] Transport Simulation Systems, "Aimsun." 2015.
- [27] R. W. Montesdeoca and E. J. Vásconez, "Análisis de los niveles de servicio mediante la implementación del tranvía en la ciudad de Cuenca," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [28] C. C. Castillo, "Estudio de los tranvías de España en la actualidad," Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza, 2010.
- [29] A. N. Malonda and J. Mir, "Estudio de movilidad asociado al paso del tranvía por la C/ Laureà Miró del T.M. d'Esplugues y propuesta de alternativas para el desvío del tráfico.," Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals, 2016.