

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN TRANSPORTE
NIVELES MACRO, MESO Y MICRO A GRAN ESCALA

Autor

Nelson Deiwer Baza Solares

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magister en Ingeniería Civil

Director

Yerly Fabian Martínez Estupiñán

Ph.D. (C)

Codirector

Miller Humberto Salas Rondón

Ph.D.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil
Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. Marco Referencial	15
2.1. Modelo Clásico de Transporte	16
2.2. Modelo de Asignación	17
2.2.1. Modelos Dinámicos de Transporte	18
2.2.2. Modelos Estáticos de Tráfico	20
2.3. Simulación de tráfico	21
2.3.1. Simulation of Urban Mobility (SUMO)	22
2.3.2. SumoPy	23
2.4. Revisión del modelado microscópico	24
2.4.1. Modelos de seguimiento vehicular	26
2.4.2. Modelos de cambio de carril	32
2.4.3. Simulación Microscópica a Gran Escala	43

3.	Escenario de simulación	47
3.1.	Red de transporte	47
3.2.	Transporte público	48
3.3.	Demanda de transporte	51
3.4.	Calibración y validación del escenario	54
3.5.	Delimitación del escenario.....	61
4.	Identificación de Parámetros de simulación	64
4.1.	Microsimulación	64
4.1.1.	Modelo de seguimiento vehicular.....	64
4.1.2.	Modelo de cambio de carril	65
4.2.	Mesosimulación	67
4.3.	Macrosimulación.....	68
5.	Generación y análisis de resultados	70
5.1.	Velocidades promedio de circulación.....	71
5.1.1.	Distribución de velocidad sobre la red de transporte.....	71
5.1.2.	Histogramas comparativos.....	76
5.1.3.	Comparación de valores individuales	80
5.1.4.	Gráficos de cajas y bigotes comparativos.....	82
5.2.	Densidades de flujo.....	84

5.2.1.	Distribución de densidad sobre la red de transporte	85
5.2.2.	Histogramas comparativos.....	88
5.2.3.	Comparación de valores individuales	89
5.2.4.	Gráficos de cajas y bigotes comparativos.....	92
5.3.	Flujos vehiculares	93
5.3.1.	Distribución de flujos sobre la red de transporte	93
5.3.2.	Histogramas comparativos.....	96
5.3.3.	Comparación de valores individuales	100
5.3.4.	Gráficos de cajas y bigotes comparativos.....	102
5.4.	Diagramas fundamentales del flujo de tráfico	104
5.4.1.	Relación Velocidad – Densidad.....	105
5.4.2.	Relación Flujo – Densidad.....	107
5.4.3.	Relación Flujo – Velocidad	110
5.5.	Comparación de resultados con datos reales	111
5.6.	Discusión.....	114
5.6.1.	Escenarios de microsimulación a gran escala.....	114
5.6.2.	Resultados de micro, meso y macrosimulación.....	115
5.6.3.	Ventajas de la microsimulación a gran escala	116
5.6.4.	Desventajas de la microsimulación a gran escala.....	117
5.6.5.	Trabajos futuros	118
6.	Conclusiones.....	120

Referencias Bibliográficas	123
Apéndices.....	133

Lista de Tablas

Tabla 1 Modelos de seguimiento vehicular	27
Tabla 2 Actualizaciones a los modelos de seguimiento vehicular.....	30
Tabla 3 Descripción de modelos de cambio de carril	35
Tabla 4 Muestra de población sintética del escenario simulado.....	52
Tabla 5 Lista de actividades de la población virtual.....	53
Tabla 6 Lista de planes de la población virtual.....	53
Tabla 7 Parámetros de modelo de seguimiento vehicular de Krauss.....	65
Tabla 8 Parámetros de modelo de cambio de carril LC2013.....	66
Tabla 9 Parámetros de modelo Mesoscópico.....	68
Tabla 10 Parámetros de modelo Macroscópico	69

Lista de Figuras

Figura 1 Interfaz gráfica de SumoPy	24
Figura 2 Clasificación de tipos de modelos de cambio de carril según Rahman et al.....	34
Figura 3 Mapa de las áreas de simulación y las ZAT (Traffic assignment zones)	50
Figura 4 Aplicación del modelo de calibración de elección de plan	56
Figura 5 Minimización de la función objetivo.....	58
Figura 6 Flujos vehiculares simulados en el escenario de Bolonia, Italia	59
Figura 7 Correlación de los flujos simulados y los flujos observados.....	60
Figura 8 Sector de estudio Corticella, Italia.....	63
Figura 9 Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Micro	72
Figura 10 Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Meso	73
Figura 11 Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Macro.....	75
Figura 12 Histograma grupal de velocidades Micro vs Meso	77
Figura 13 Histograma grupal de velocidades Micro vs Macro.....	78
Figura 14 Histograma grupal de velocidades Meso vs Macro.....	79
Figura 15 Gráfico de valores individuales de velocidad.....	81
Figura 16 Grafica de caja grupal para velocidades Micro, Meso y Macro.....	83
Figura 17 Valores atípicos de velocidad en los resultados Meso	84
Figura 18 Densidad promedio sobre la red vial – escenario Micro	86
Figura 19 Densidad promedio sobre la red vial – escenario Meso	87

Figura 20 Saturación sobre la red vial – escenario Macro.....	88
Figura 21 Histograma grupal de densidades Micro vs Meso.....	89
Figura 22 Valores individuales de densidad escalas Micro y Meso	90
Figura 23 Valores individuales de saturación en la escala Macro	92
Figura 24 Flujos promedio sobre la red vial – escenario Micro	94
Figura 25 Flujos promedio sobre la red vial – escenario Meso	95
Figura 26 Flujos promedio sobre la red vial – escenario Macro.....	96
Figura 27 Histograma grupal de flujo Micro vs Meso.....	98
Figura 28 Histograma grupal de flujo Micro vs Macro	99
Figura 29 Histograma grupal de flujo Meso vs Macro	100
Figura 30 Gráfico de valores individuales de flujo.....	102
Figura 31 Grafica de caja grupal para flujos Micro, Meso y Macro.....	103
Figura 32 Via Stendha – Corticella.....	104
Figura 33 Relación Velocidad vs Densidad.....	107
Figura 34 Relación Flujo vs Densidad.....	109
Figura 35 Relación Flujo vs Velocidad	111
Figura 36 Detectores dispuestos en el distrito de Corticella, Italia.....	112
Figura 37 Correlación de datos reales con resultados simulados	113

Resumen

Título: Análisis comparativo de modelos de simulación en transporte niveles macro, meso y micro a gran escala *

Autor: Nelson Deiwer Baza Solares **

Palabras Clave: Microsimulación de tráfico, Mesosimulación de tráfico, Macrosimulación de tráfico, Simulación de tráfico a gran escala.

El constante aumento de la compleja dinámica de transporte de los centros urbanos deja en evidencia la gran necesidad de calibrar escenarios de microsimulación cada vez más grandes y detallados, que permitan obtener resultados más aproximados a los patrones de desplazamiento de la población con el fin de optimizar los procesos de planificación y sectorizar estrategias que mitiguen las externalidades negativas asociadas al transporte. Sin embargo, la construcción de este tipo de escenarios generalmente demanda grandes cantidades de información, recursos económicos y capacidad computacional. En el presente estudio se abordan las bondades que ofrece el uso de escenarios de microsimulación a gran escala respecto a la simulación meso y macro, para esto, se dispuso de un escenario de caso de estudio, desde el cual se ejecutaron simulaciones micro, meso y macro para evaluar las ventajas y desventajas entre los diferentes niveles de simulación cuando se aplican en áreas geográficas grandes. Además, se profundizó en los principales aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de construir este tipo de escenarios y lo que se requiere para calibrarlos y validarlos con una baja inversión económica. Se identificó que, para un mismo escenario, los resultados de simulaciones meso y macro tienen a ser mayores respecto a los resultados obtenidos empleando las simulaciones micro; además, en cuanto mayor sea la escala, menor será el grado de concentración de datos alrededor de la media; también se identificó que la densidad de congestiónamiento en la escala meso se alcanza en un menor periodo de tiempo respecto a la densidad de congestiónamiento de la escala micro.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Yerly Fabian Martínez Estupiñán. Ph.D. (c) Codirector: Miller Humberto Salas Rondón. Ph.D.

Abstract

Title: Comparative analysis of large-scale macro-, meso- and micro-level transport simulation models*

Author: Nelson Deiwer Baza Solares**

Key Words: Traffic microsimulation, Traffic mesosimulation, Traffic macrosimulation, Large-scale traffic simulation.

The constant increase in the complex transport dynamics of urban centers highlights the great need to calibrate increasingly large and detailed microsimulation scenarios that allow obtaining results that more closely approximate the population's travel patterns to optimize planning processes and sectorize strategies that mitigate the negative externalities associated with transport. However, the construction of this type of scenario generally requires large amounts of information, economic resources, and computational capacity. This study addresses the benefits offered by the use of large-scale microsimulation scenarios concerning meso and macro simulation. For this purpose, a case study scenario was used, from which micro, meso, and macro simulations were run to evaluate the advantages and disadvantages between the different simulation levels when applied to large geographic areas. In addition, the main aspects to be taken into account when building this type of scenario and what is required to calibrate and validate them with a low economic investment were discussed in depth. It was identified that, for the same scenario, the results of meso and macro simulations tend to be greater concerning the results obtained using micro simulations; in addition, the larger the scale, the lower the degree of data concentration around the mean; it was also identified that the congestion density at the meso scale is reached in a shorter period concerning the congestion density of the micro-scale.

* Degree Work

**Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Yerly Fabian Martínez Estupiñán. Ph. D. (c) Codirector: Miller Humberto Salas Rondón. Ph.D.

Introducción

Durante los últimos años el uso de herramientas de simulación para el diseño, evaluación y análisis de sistemas de transporte se ha convertido en un elemento fundamental en la planificación de transporte y en lo que respecta a la toma de decisiones, esto se debe en gran parte a la evolución de la capacidad computacional, el aumento de la dinámica de transporte en los centros urbanos, así como a los avances en el desarrollo tecnológico para recolectar, almacenar y procesar grandes cantidades de información y a la creciente necesidad de simular sistemas complejos de una forma cada vez más aproximada a la realidad.

Diversas investigaciones relacionadas con la recopilación de la información, el almacenamiento y el uso de esta para mejorar las condiciones de transporte de las ciudades se han desarrollado en los últimos años (Codeca et al., 2017; Horiguchi & Kuwahara, 2005; Maerivoet & de Moor, 2005). Se han abordado problemas que involucran la interacción del transporte multimodal a nivel de ciudad, el uso de Sistemas Inteligentes de Transporte (Codeca et al., 2017), escenarios con accidentes (Chen et al., 2013), eventos de construcción (Giuffrè et al., 2017), eventos de evacuación (Robinson et al., 2018) y de que formas puede emplearse la información para optimizar el tráfico de las ciudades.

Dependiendo del problema que desee estudiarse se puede establecer un escenario de simulación con características específicas. La simulación microscópica involucra el estudio de los patrones de desplazamiento de cada vehículo como un elemento de análisis independiente, esto demanda una gran cantidad de información y requerimientos computacionales, debido a esto generalmente se emplean en áreas pequeñas, por lo tanto, se espera que genere resultados más cercanos a la realidad. Por otra parte, en la simulación mesoscópica y macroscópica se estudian

los flujos vehiculares desde diferentes niveles de agregación, esto hace que este tipo de simulaciones sean empleados en el análisis de áreas más grandes en comparación con las que normalmente se usan en los análisis de microsimulación (Barceló, 2010).

Los avances tecnológicos permiten establecer cada vez retos más altos al momento de realizar simulaciones de transporte, ahora el desafío es poder generar simulaciones que abarquen zonas urbanas muy extensas, que sean realistas, a un nivel muy alto, desde una perspectiva de simulación cada vez más refinada, permitiendo una imitación fiel de los grandes flujos de tráfico e interacciones que se presentan en un área metropolitana (Sandesh Uppoor & Marco Fiore, 2011). En la actualidad, pocos escenarios de simulación a gran escala han sido debidamente construidos y pueden ser empleados en el desarrollo de investigaciones, ya sea porque solo se modelan las principales arteras y se dejan de lado las calles locales en zonas urbanas (Cetin et al., 2003) o porque no se encuentran debidamente validados al emplear la generación de viajes de forma aleatoria (Lu et al., 2020). Se han construido microsimulaciones a gran escala para las ciudades de Manhattan, Paris, Berlín, Roma y Londres (Schweizer et al., 2021) empleando generación de viajes de forma aleatoria, sin embargo, los resultados indican velocidades irrealmente bajas en comparación con los valores reales.

Una cuestión de interés en la construcción de escenarios a gran escala radica en las bondades que ofrece de este tipo de escenarios en cada una de las diferentes escalas de simulación, es decir, en la actualidad se cuenta con la capacidad computacional para construir escenarios de simulación cada vez más refinados, pero ¿deben seguir siendo construidos en un nivel de análisis agregado (macro)? ¿vale la pena construir escenarios micro a gran escala? ¿pueden construirse

escenarios de microsimulación a gran escala con un bajo costo? ¿para qué condiciones de estudio podría ser útil el uso de este tipo de escenarios?

En este orden de ideas, la presente investigación busca dar respuesta a los cuestionamientos anteriormente descritos a través del estudio de la construcción, generación y análisis de resultados las simulaciones realizadas en los niveles micro, meso y macro de un escenario a gran escala (Corticella, Italia).

La estructura de este documento muestra en el *Capítulo 2* la descripción de los elementos que enmarcan la teoría de modelado para cada una de las escalas de simulación de interés, profundizando especialmente en los modelos de simulación microscópica. Adicionalmente se describe el software de simulación que sirvió de apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

En el *Capítulo 3* se describe todo lo referente al escenario de simulación con el que se trabajó, específicamente se detalla la información empleada y sus respectivas fuentes, la demanda de transporte que se utilizó, la forma como se calibró y validó el escenario y finalmente lo referente a la delimitación para el uso del distrito de Corticella (Italia) como área de estudio.

El *Capítulo 4* presenta los parámetros de modelado pertinentes para cada una de las escalas de simulación, esto teniendo en cuenta el software de simulación empleado en la presente investigación, ya que cada software emplea modelos de simulación diferentes. Finalmente, en el *Capítulo 5* se agrupa todo lo referente a la comparación de los resultados obtenidos entre las diferentes escalas, aquí, se comparan los resultados de velocidad, densidad y flujo empleando técnicas estadísticas como un apoyo fundamental. En cada uno de los capítulos anteriormente mencionados presentan sus propias conclusiones y adicionalmente en el final del documento se integran las conclusiones generales de la investigación.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar las ventajas y desventajas del uso de técnicas de Microsimulación de tráfico en modelos a gran escala respecto a técnicas Macro y Meso mediante un análisis para la ciudad de Bolonia, Italia.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros requeridos para los diferentes enfoques de simulación, así como las metodologías, complejidad de datos de entrada, nivel de detalle de resultados, problemas y retos futuros. (*Capítulo 4. Identificación de Parámetros de simulación*).
- Establecer un escenario de simulación para ejecutar en escala Micro, Macro y Meso en modelos a gran escala mediante un caso de estudio para la ciudad de Bolonia, Italia (*Capítulo 3. Escenario de simulación*).
- Realizar un análisis comparativo de los resultados de cada uno de los modelos para medir su exactitud con respecto a los datos reales. (*Capítulo 5. Generación y análisis de resultados*).

2. Marco Referencial

Durante las últimas décadas los modelos matemáticos de la dinámica de redes potenciaron en gran manera los modelos de simulación de redes de tráfico, los cuales comenzaron a adquirir popularidad en todo el mundo. Probablemente la primera contribución fue hecha por Merchant y Nemhouser (1978). Desde ese entonces se han propuesto modelos de asignación dinámica, estos aportes fueron de especial importancia como un insumo al modelado actual de transporte (Horiguchi & Kuwahara, 2005). Es posible definir un modelo de transporte como una representación aproximada de la realidad basada en características específicas, que puede ser empleado para realizar un análisis determinado (Hallmann, 2011).

Sin embargo, al ser una representación aproximada de la realidad se hace necesario ajustarla para que los resultados y conclusiones que se obtengan a partir de ella sean representativas, es allí donde surge la necesidad de realizar un proceso de calibración. La calibración de un modelo de transporte requiere tener conocimiento del comportamiento del tráfico del sector, teniendo en cuenta que no hay una forma única de modelar un sistema, es así como calibrar puede ser entendido como el proceso en el cual a través de datos de campo se definen parámetros a fin de producir un modelo lo suficientemente cercano a la realidad, su objetivo n es encontrar los valores de estos parámetros que producirán un modelo válido. (Barceló, 2010).

Una vez calibrado el modelo, es necesario realizar la validación, en la cual se busca conocer si el modelo de simulación es una representación precisa del sistema que se está estudiando. La validación es un proceso iterativo que calibra los parámetros del modelo en donde se hacen comparaciones entre los resultados del modelo con el comportamiento real del sistema y utiliza estas diferencias e información para mejorar el modelo hasta que la precisión de los resultados sea

aceptable. Cuando el modelo se encuentra calibrado y validado es posible proceder a la asignación de tráfico, este es el proceso para conocer cómo es que la demanda se carga en una red de transporte y cuáles son los flujos existentes en cada tramo de la red.

La asignación de la demanda es uno de los componentes más importantes de cualquier modelo de transporte, ya que con base en ella se predicen efectos de los cambios a largo plazo en la red de carreteras, se puede predecir el comportamiento del tráfico durante eventos especiales desarrollados en una ciudad y ayuda a entender las relaciones entre el tráfico como un todo y las decisiones individuales de los conductores, entre otros (Hallmann, 2011).

2.1. Modelo Clásico de Transporte

El modelo clásico de asignación de demanda se conoce como el modelo de cuatro etapas y es útil para entender de forma práctica el comportamiento de los viajes en una red de transporte desde el momento en que se generan en un sector específico de una ciudad, se desarrollan sobre los corredores viales y finalizan en el sector de destino.

El modelo de cuatro etapas se encuentra compuesto por cuatro submodelos: generación/atracción (cantidad de viajes), distribución de los viajes (cual es el origen y el destino de los viajes), partición modal (cual es el modo de transporte de cada viaje) y la asignación (como se distribuyen los viajes) (Barceló, 2010; Hallmann, 2011). Las primeras tres etapas son conocidas como la demanda de transporte y la cuarta etapa también conocida como oferta, en la cual se realiza la asignación de los viajes a la red de transporte.

En la etapa de asignación de viajes a la red de transporte se originan los modelos dinámicos (microsimulación y mesosimulación) y los modelos estáticos (macrosimulación), los cuales son el

principal interés de análisis de este trabajo, por causa de esto, durante el desarrollo de este capítulo únicamente se profundizará la descripción de los modelos de la etapa de asignación de viajes.

Cada una de las etapas del modelo clásico cuenta con métodos para calcular y predecir la demanda y la oferta en el modelo, sin embargo, es necesario que entre las etapas exista una relación llamada modelo de equilibrio entre la oferta y demanda (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Los principales insumos de este modelo son: La zonificación, la red de transporte, la demanda (generalmente representada por una matriz origen – destino de viajes) y los modos de transporte empleados para cada viaje (Valladares, 2016).

2.2. Modelo de Asignación

Partiendo de la demanda de viajes (la cual es representada como una matriz Origen – Destino) como un insumo, el modelo de Asignación tiene en cuenta características propias de la red de transporte (como por ejemplo el tiempo de viaje, la longitud y la capacidad) para para estimar como se cargan los flujos vehiculares dentro de la red (Gabriel & Díaz, 2010).

“Los Modelos de Asignación basados en el principio de Wardrop son conocidos como modelos de equilibrio de usuario. Esta hipótesis de modelado, empleada para las demandas de tráfico y los flujos medios no dependientes de la hora del día, ha apoyado los modelos tradicionales de planificación del transporte utilizados en la práctica para la planificación estratégica.” (Barceló, 2010).

Los Modelos de Asignación pueden clasificarse en: Modelos Dinámicos de Transporte y Modelos Estáticos de Transporte. A continuación, se describen con mayor detalle cada uno de estos modelos.

2.2.1. Modelos Dinámicos de Transporte

Este tipo de modelo se conoce también como Asignación Dinámica de Tráfico (DTA) por sus siglas en inglés, y se caracterizan por ser capaces de describir cómo se desarrollan espacial y temporalmente los patrones de flujo en una red de transporte en función de la demanda de viajes, la oferta de la red y sus complejas interacciones (Mahmassani, 2001).

“Los modelos de análisis de redes dinámicas intentan proporcionar una forma más detallada para representar la interacción entre las elecciones de viaje, los flujos de tráfico, y las medidas de costos de tiempo y costo de una forma temporalmente coherente. Mas concretamente, los modelos DTA tienen por objeto describir la red variable en el tiempo y la interacción de la demanda empleando un enfoque de comportamiento adecuado. Los resultados del análisis del modelo DTA pueden ser utilizados para evaluar muchas medidas significativas relacionadas con el tiempo y el costo de los viajes individuales, así como las medidas de la red a nivel de todo el sistema para propósitos de planificación regional.” (Chiu et al., 2011).

2.2.1.1. Modelos de Simulación Microscópica

La microsimulación permite representar el tráfico y su comportamiento de manera rápida, una vez que se ha construido un modelo es útil para evaluar escenarios con problemas críticos que surgen en una red vial. En la actualidad, estos modelos pueden ser empleados en tiempo real para comunicar a los conductores acerca de eventos específicos que pueden afectar de forma positiva o negativa su viaje, y de esta forma ajustar la ruta.

Comúnmente los modelos de microsimulación se emplean en el estudio de pequeñas porciones de una red vial con el fin de evaluar las condiciones actuales de tráfico, los resultados

de esta evaluación pueden ser expresados en términos de nivel de servicio, además, los modelos de microsimulación permiten estudiar posibles escenarios orientados hacia el mejoramiento de la operación del tráfico en el sector (Ulak et al., 2019).

Los resultados de estos modelos son de gran precisión y especificidad, pero generar este tipo de resultados demanda gran cantidad de información como la cantidad de viajes, modo de transporte empleado para hacer los viajes, origen y destino de cada viaje, configuración geométrica de la red de transporte, cantidad de giros en las intersecciones, número de carriles y sus respectivos anchos, etc., la necesidad de esta información se traduce en una alta inversión económica. Hoy por hoy la información es cada vez es más abundante y accesible en gran cantidad de países, lo cual permite pensar en la construcción y análisis de modelos de microsimulación a gran escala.

2.2.1.2. Modelos de Simulación Mesoscópica

Los modelos Mesoscópicos surgen como una simplificación en la que se capta lo esencial de la dinámica, pero es menos exigente con los datos y, computacionalmente es más eficiente que los modelos Microscópicos. En este tipo de modelos se unifican aspectos Microscópicos y aspectos Macroscópicos, como los relativos a la dinámica de los vehículos. Estos modelos pueden estar regidos por dos enfoques principales, en el primero los modelos cuentan con agrupaciones de vehículos (conocidos como pelotones o macro – partículas) que se desplazan a lo largo de los tramos viales, y en el segundo la dinámica de los flujos está determinada por la dinámica simplificada de los vehículos individuales (Barceló, 2010).

La información que alimenta los Modelos de Simulación Mesoscópica proviene de las matrices Origen – Destino; en estos modelos se asume que el grupo de vehículos se mueve en un

tramo de red a la misma velocidad durante un periodo específico de tiempo y que su velocidad está en función de la densidad del tramo de red (Jayakrishnan et al., 1994).

2.2.1.3. Modelos de Simulación Nanoscópico

Los modelos nanoscópicos representan una nueva tendencia de simulación, en la cual se amplía la visión de los vehículos, dividiéndolos en partes. Es especialmente empleada en la conducción autónoma y la robótica automatizada, existiendo un potencial intercambio de información entre los grupos de estudio del tráfico y la robótica (Sharafat & Schweizer, 2014).

2.2.2. Modelos Estáticos de Tráfico

En este tipo de modelos, la hora del viaje no es tenida en cuenta como un aspecto importante dentro de la selección de una ruta óptima, es decir que la elección de ruta y las tasas de flujo son por todo el tiempo de la simulación y no por el periodo de tiempo (Barceló, 2010).

En los Modelos Estáticos las propiedades de congestión de cada tramo de vía se describen mediante una función de Volumen – Demora, VDF por sus siglas en inglés. Esta función expresa el tiempo de viaje medio en función del volumen de tráfico en un tramo de vía. En este tipo de modelos, el flujo que entra al tramo vial es siempre igual al flujo que sale, teniendo en cuenta que el tiempo de viaje aumenta a medida que aumenta el volumen sobre el tramo vial (Chiu et al., 2011).

2.2.2.1. Modelos de Simulación Macroscópica

En este tipo de modelos el flujo de tráfico se describe de forma análoga a los líquidos o gases en movimiento. Es por esto por lo que en ocasiones son llamados también modelos hidrodinámicos. Aquí, las variables dinámicas son cantidades agregadas localmente como la densidad del tráfico, el flujo, la media de la velocidad o la variación de la velocidad. Dado que la agregación es un nivel local estas cantidades generalmente varían en función del tiempo y el espacio, de esta forma, los modelos Macroscópicos son capaces de describir fenómenos colectivos como la evolución de las regiones congestionadas o la velocidad de propagación de las ondas de tráfico (Treiber & Kesting, 2013).

El modelado Macroscópico de flujos de tráfico generalmente se soporta en la teoría del flujo de tráfico continuo, la cual tiene como objetivo describir la evolución espacio – temporal de las variables que caracterizan los fluidos macroscópicos: volumen, velocidad y densidad. En esta teoría se asume que, entre dos estaciones de conteo en un tramo de autopista sin entradas ni salidas, el número de vehículos siempre se conserva (Barceló, 2010).

2.3. Simulación de tráfico

La simulación puede definirse como un conjunto de técnicas que permiten emplear computadores para imitar el funcionamiento de un sistema del mundo real, lo cual permite realizar experimentaciones que podrían tener un alto costo en el mundo real o que podrían poner en riesgo la integridad de los usuarios del sistema (Barceló, 2010).

En la actualidad existen una gran cantidad de simuladores de transporte tanto comerciales como de código abierto, sin embargo, la presente investigación se desarrolla empleando SumoPy,

el cual funciona como una extensión gráfica e intuitiva del software SUMO, a continuación, se describen en detalle las herramientas anteriormente citadas.

2.3.1. *Simulation of Urban Mobility (SUMO)*

“Simulation of Urban Mobility” (SUMO) es un paquete de microsimulación de tráfico multimodal portable de fuente abierta diseñado para el manejo de grandes redes de carreteras desarrollado por el Instituto de Sistemas de Transporte del Centro Aeroespacial Alemán. El software permite simular la demanda de tráfico, la cual consiste en vehículos individuales que se desplazan a través de la red de transporte. (*Documentation - SUMO Documentation*, n.d.).

Pese a que en términos generales SUMO es un paquete especializado en microsimulación, en la actualidad también se permite la ejecución de simulaciones en escalas meso y macro. En el caso de la escala meso la información de entrada puede ser la misma que la introducida en la escala Micro, con la diferencia de que, debido a la simplificación de los elementos modelados, la simulación se ejecutará cien veces más rápido que en la simulación micro.

Algunas de las aplicaciones más destacadas del software incluyen la evaluación y optimización de semaforización, elección de ruta y re-ruteo, simulación de comunicaciones vehiculares y el pronóstico de tráfico entre otras. A pesar de que el software ha sido mejorado de forma continua durante los últimos años, se ha utilizado para el desarrollo de investigaciones y anualmente se celebra la conferencia de usuarios de SUMO en Europa, el software es principalmente empleado por especialistas informáticos, esto debido a que los usuarios del software deben tener un alto grado de conocimiento en el uso líneas de comando sin interfaz gráfica, lo cual muchas veces no poseen los expertos en transporte.

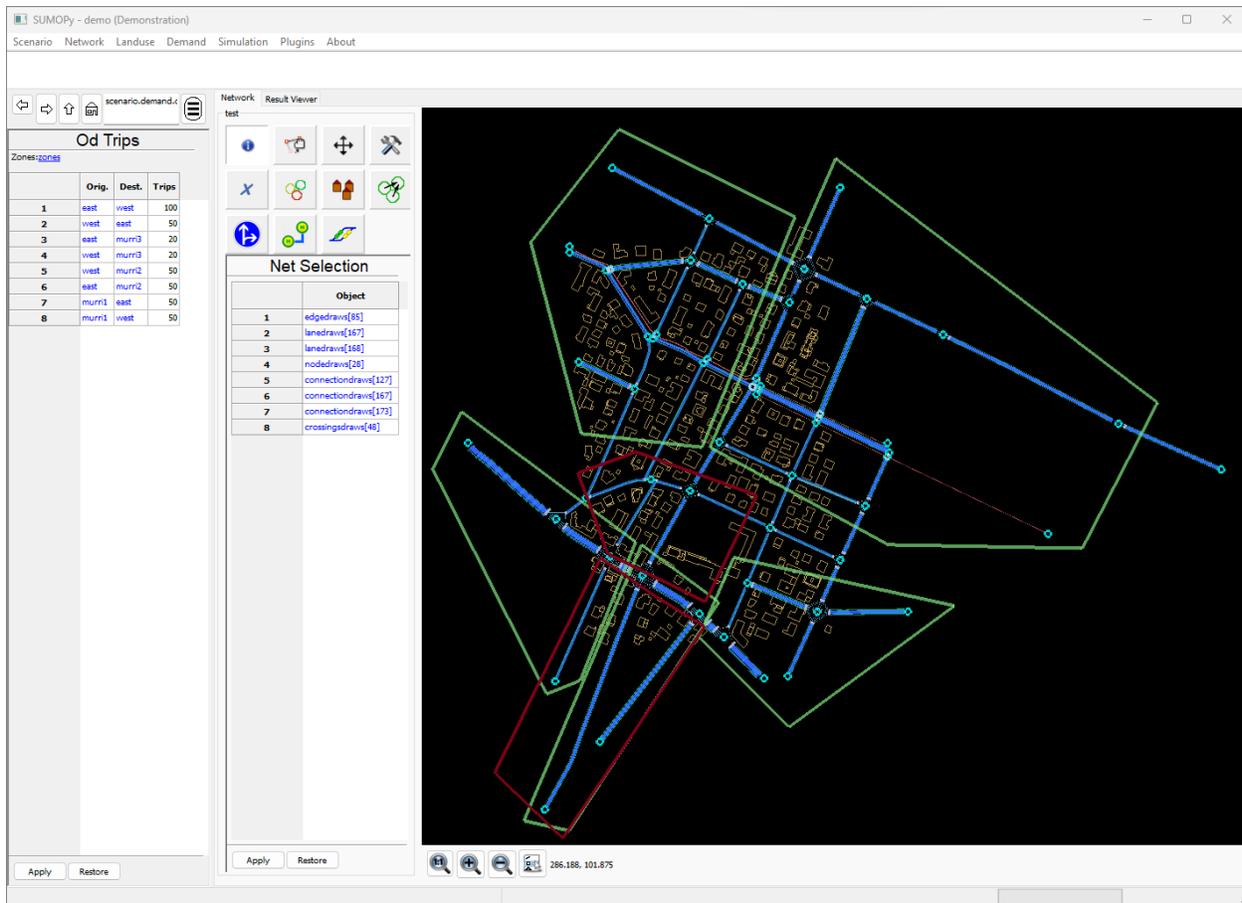
SUMO emplea modelos de seguimiento vehicular y modelos de cambio de carril de forma separada para representar el comportamiento de los conductores. En la sección 2.4 se profundiza sobre la historia del modelado microscópico de tráfico, adicionalmente, en el *Capítulo 4* se profundiza en los parámetros de simulación que emplea el software SUMO.

2.3.2. *SumoPy*

SumoPy es una suite de microsimulación fácil de emplear y muy flexible en la cual se amplía la gestión de la gran cantidad de datos necesarios para ejecutar complejas simulaciones multimodales, esto incluye diferentes modos de generación de demanda, así como también un gran rango de modos de transporte público, bicicletas y Tránsito Rápido Personal (PRT). SumoPy cuenta con una interfaz gráfica (ver Figura 1) de usuario que facilita el uso de la herramienta a los expertos en transporte además cuenta con un lenguaje de programación sencillo que facilita el uso de SUMO (Sharafat & Schweizer, 2014).

SumoPy es una iniciativa de la Universidad de Bolonia, la cual se encuentra desarrollando e investigando la suite de simulación desde el año 2013. El software se encuentra enteramente construido en Python 2.7, el cual es un lenguaje de programación orientado a objetos. Además de ofrecer una interfaz gráfica para el uso de las herramientas de SUMO, SumoPy cuenta con una gran biblioteca que permite la creación de scripts de forma relativamente sencilla.

Figura 1
Interfaz gráfica de SumoPy



Nota: Elaboración propia.

2.4.Revisión del modelado microscópico

La investigación acerca de modelos de flujo de tráfico tuvo sus inicios en la década de los 50's cuando Lighthill y Whitham presentaron un modelo que consistía en la representación de vehículos dentro de un flujo de tráfico como partículas en un fluido. Desde ese entonces a través de diferentes investigaciones y estudios se ha permitido el desarrollo de los modelos de microsimulación, que permiten representar variadas características de la operación del flujo de

tráfico, como el comportamiento espaciotemporal de un conductor individual o grupos vehículos bajo la influencia de los vehículos cercanos (Hoogendoorn & Bovy, 2001).

La microsimulación busca representar el tráfico vehicular y su comportamiento de forma eficiente. El modelado microscópico tiene como fin representar el movimiento individual de cada vehículo dentro de un flujo de tráfico, estos movimientos se encuentran definidos con base en las acciones de los conductores, tales como la aceleración, la desaceleración y los cambios de carril (Barceló, 2010). Una vez que se ha construido un modelo, este es útil en primer lugar para tener una visión a escala y controlada de la situación actual de una zona específica (ejemplo: intersección vial), posteriormente puede ser utilizado para analizar sectores con problemas críticos, así como evaluar escenarios alternativos que involucran diversos modos de transporte a fin de mejorar u optimizar elementos propios de los sistemas de transporte o de una infraestructura particular. Comúnmente los modelos de microsimulación se emplean en el estudio de pequeñas porciones de una red vial con el fin de evaluar las condiciones actuales de tráfico, los resultados de esta evaluación pueden ser expresados en términos de nivel de servicio, tiempos de viaje, velocidades de recorrido, tiempos de espera o emisiones contaminantes entre otros; además, permiten estudiar posibles escenarios orientados hacia el mejoramiento de la operación del tráfico en el sector (Ulak et al., 2019), así como las interacciones entre diferentes actores con un nivel de detalle y precisión alto.

Existen dos factores imprescindibles para el análisis del flujo de tráfico que se distinguen por su descripción de las interacciones longitudinales y laterales de los vehículos en carretera. Estos componentes se definen como el seguimiento vehicular y el cambio de carril. Los modelos de seguimiento vehicular pueden ser considerados como los más importantes y representativos

dentro de la microsimulación debido a que permiten entender la dinámica de los vehículos desde un enfoque individual, es decir, describen el comportamiento de los conductores dentro de una corriente de tráfico longitudinal en la que interactúan con otros vehículos. Por otra parte, los modelos de cambio de carril proporcionan un análisis de la interacción individual lateral de los vehículos dentro del flujo de tráfico, interacción que con el pasar del tiempo y la evolución tecnológica de los automóviles ha generado dificultades en la seguridad del tránsito (Zheng, 2014).

A continuación, se explican en detalle el desarrollo que han tenido los diferentes enfoques que se han utilizado en la microsimulación en transporte.

2.4.1. Modelos de seguimiento vehicular

Los modelos de seguimiento vehicular describen el comportamiento del conductor bajo la interacción con otros vehículos. Se puede afirmar que un modelo de seguimiento es capaz de describir todas las situaciones ya sea que incluyan aceleración y velocidad en tráfico libre, situaciones estacionarias y no estacionarias que específicamente involucran el movimiento longitudinal (Treiber & Kesting, 2013)

Durante la década de los 60's las investigaciones se enfocaron en los modelos de seguimiento al líder, estos modelos se fundamentaban en la suposición de mecanismos que permitieran describir el proceso de un vehículo siguiendo a otro vehículo (Hoogendoorn & Bovy, 2001).

(van Wageningen-Kessels et al., 2014) establece que las ramificaciones más destacadas de los modelos de seguimiento vehicular incluyen los modelos de distancia de seguridad, los modelos de estímulo-respuesta, los modelos de puntos de acción (psicofísicos) y los más recientes modelos

de autómatas celulares. En la Tabla 1 se describen los modelos más relevantes dentro de la teoría de seguimiento vehicular junto con las variables utilizadas.

Tabla 1
Modelos de seguimiento vehicular

Modelo	Descripción	Variables
Modelo de distancia de seguridad de Reuschel & Pipes	<p>El modelo describe las reacciones de dos vehículos consecivos en el mismo carril, a cierta distancia; permitiendo identificar que la distancia de seguridad se incrementa linealmente con la velocidad del vehículo (Pipes, 1953).</p> $D_n(v) = L_n \left(1 + \frac{v}{16.1} \right)$	<p>D_n: distancia de avance. n: vehículo. v: velocidad. $n - 1$: vehículo anterior. L_n: longitud del vehículo n.</p>
Modelo de Estimulo-Respuesta GHR	<p>Entre los modelos de seguimiento vehicular de estímulo-respuesta se asume que los conductores aceleran o desaceleran como una reacción inmediata a un estímulo provocado por la corriente de tráfico. También es conocido como el modelo GHR (Gazis-Herman-Rothery) (Gazis et al., 1961).</p> $a_n(t) = \gamma \frac{(v_{n-1}(t))^{c1}}{(s_n(t - T))^{c2}} \dot{s}_n(t - T)$	<p>$a_n(t)$: Aceleración del vehículo n. $v_{n-1}(t)$: Velocidad del sujeto. $s_n(t - T)$: distancia entre vehículo sujeto y líder. $\dot{s}_n(t - T)$: velocidad del líder. $c1, c2, \gamma$: parámetros.</p>
Modelo psicofísico de Wiedemann	<p>En este modelo cada conductor tiene diferentes capacidades de conducción para la percepción, la reacción, la velocidad deseada y la agresividad. Según el autor, este tipo de comportamiento de los conductores puede ser representado a través de una distribución normal, con el fin de obtener los valores umbrales y las funciones de conducción. Wiedemann define umbrales para el comportamiento psicofísico seguidor-lider, dentro de los umbrales definidos se encuentran la distancia deseada, la distancia de seguimiento deseada, la distancia de seguimiento máxima, el umbral de</p>	<p>AX: Distancia deseada para un vehículo estacionario. L: Distancia frontal deseada. $RND1$: Número de conductores con distribución normal. $AXadd$: Parámetro de calibración aditivo.</p>

percepción y las diferencias entre las velocidades que aumentan y disminuyen (R. Wiedemann, 1974).

Umbral de distancia deseada:

$$AX = L_{n-1} + AXadd + RND1_n * AXmult$$

Plantea un nuevo modelo para la respuesta de los vehículos de seguimiento con base en la idea de que los conductores definen límites en sus índices de frenado y aceleración con el fin de alcanzar una velocidad segura (Gipps, 1981).

Refinado de modelo de distancia de seguridad de Gipps.

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ v_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{\left(0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n} \right)}, b_n\tau + [b_n^2\tau^2 - b_n[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b}]^{1/2}] \right\}$$

Modelo computacional conformado por una matriz unidimensional que cuenta con condiciones periódicas de frontera. El modelo tiene como punto de partida una configuración arbitraria desde la cual se van actualizando las velocidades y posiciones del sistema basado en la siguiente serie de pasos:

Autómatas celulares de Nagel & Schreckenberg

AXmult: Parámetro de calibración multiplicativo.

n: vehículo.

n - 1: vehículo anterior.

a_n: Máxima aceleración deseada del vehículo *n*

Parámetros.

b_n: Frenado más severo que el conductor del vehículo *n* desea realizar.

s_n: Tamaño del vehículo más un margen en el que el vehículo siguiente no está dispuesto a entrometerse.

v_n: Velocidad a la que desea viajar el conductor del vehículo *n*.

x_n(t): Ubicación de la parte delantera del vehículo *n* en el momento *t*.

v_n(t): Velocidad del vehículo *n* en el momento *t*.

τ: Tiempo de reacción aparente, una constante para todos los vehículos.

v: Velocidad vehicular.

i, j: Posiciones vehiculares.

P: Probabilidad específica.

Modelo de Velocidad Optima de Bando	<p>Aceleración: Si la velocidad v de un vehículo es menor que la velocidad máxima y si la distancia al vehículo de adelante es mayor que $v+1$, entonces la velocidad crece en uno para el vehículo inicial.</p> <p>Reducción de velocidad: Si un vehículo en la posición i observa el siguiente vehículo en la posición $i+j$, entonces este reduce su velocidad a $j-1$.</p> <p>Aleatoriedad: Con una probabilidad P, la velocidad de cada vehículo se disminuye en uno.</p> <p>Movimiento vehicular: Cada vehículo avanza v posiciones (Nagel & Schreckenberg, 1992).</p>	<p>n: número de vehículo ($n=1,2,3, \dots, N$).</p> <p>N: número total de vehículos.</p> <p>a: constante que representa la sensibilidad del conductor</p> <p>x_n: coordenada del n-avo vehículo.</p> <p>V: velocidad legal (optima)</p>
	<p>Se presenta un modelo dinámico para la congestión del tráfico soportada en el uso de la ecuación de movimiento de cada vehículo. Mediante la investigación analítica y numérica se propone la velocidad legal (optima) como una función de la distancia del vehículo precedente. (Bando et al., 1995).</p>	<p>D_n: distancia de avance</p> <p>v: velocidad.</p> <p>d_m: constante de la distancia mínima entre vehículos.</p> <p>T: tiempo de reacción</p> <p>F: factor de riesgo de velocidad.</p> <p>L_n: longitud del vehículo n.</p> <p>\dot{v}_α: aceleración del vehículo α.</p> <p>δ: componente de la aceleración.</p> <p>S^*: espacio deseado.</p>
	$\ddot{x}_n = a\{V(\Delta x_n) - \dot{x}_n\}$ $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$	
Modelo de distancia de seguridad De Jepsen	<p>A partir de la afirmación de Leutzbach sobre un tiempo de reacción compuesto por el tiempo de percepción, el cual es el tiempo necesario para que el conductor perciba que existe un obstáculo, se planteó la siguiente expresión indicando que los conductores aumentan su distancia en función de la velocidad a fin de evitar las colisiones traseras (Jepsen, 1998).</p>	
	$D_n(v) = (L_n + d_m) + v(T + vF)$	
Modelo del conductor inteligente de Treiber	<p>Se describen la aceleración como una función del espacio, la velocidad y la diferencia de velocidad entre un vehículo dado y el vehículo en frente. (Treiber et al., 2000).</p>	

$\dot{v}_\alpha = a^{(\alpha)} \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0^{(\alpha)}} \right)^\delta - \left(\frac{S^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{S_\alpha} \right)^2 \right]$	a: máxima aceleración b: máxima. desaceleración.
$S^*(v, \Delta v) = S_0^{(\alpha)} + S_1^{(\alpha)} \sqrt{\frac{v}{v_0^{(\alpha)}}} + T^\alpha v + \frac{v \Delta v}{2\sqrt{a^{(\alpha)} b^{(\alpha)}}}$	T: tiempo mínimo de avance. v ₀ : velocidad libre.

Nota: Elaboración propia.

Los modelos descritos en la Tabla 1 constituyen el pilar de partida desde el cual se ha estructurado la base del seguimiento vehicular de nuestros tiempos. Partiendo de estos modelos base se han realizado gran cantidad de trabajos que aportan de forma significativa al desarrollo de la microsimulación, contribuyendo a una representación de la realidad cada vez más acertada. en la Tabla 2 se presentan las actualizaciones más relevantes.

Tabla 2
Actualizaciones a los modelos de seguimiento vehicular

Modelo base	Descripción
Distancia de seguridad	Se analizaron e incluyeron características propias del comportamiento de los conductores como la agresividad y la timidez con el fin de caracterizar la aparición de oscilaciones y posterior transformación en ondas de parada y arranque (Laval & Leclercq, 2010).
Distancia de seguridad	Se realizó una propuesta de modelo híbrido en el que se combina la representación del flujo (macroscópica) y una representación vehicular (microscópica). Aquí se demuestra que el modelo resultante posee buenas propiedades en lo que respecta a la congestión y la suavización del flujo en las interfaces de los dos modelos. (Bourrel & Lesort, 2003).
Distancia de seguridad	En los sistemas de Control de Crucero Adaptativo (ACC), los vehículos seguidores recolectan información de características de los vehículos predecesores para realizar ajustes automáticos a la velocidad y de esta forma mantener una distancia de seguridad adecuada con dichos vehículos. Por otra parte, en los sistemas Cooperativos de Control de Crucero

Estimulo-respuesta	<p>Adaptativo (CACC) adicional a la medición de la distancia con el predecesor, los vehículos pueden intercambiar información mediante comunicación inalámbrica. (van Arem et al., 2006).</p> <p>Se incluyó en el modelado la combinación de características de heterogeneidad (las unidades vehículo-conductor se comportan de forma diferente) y la multianticipación (varios vehículos líderes influyen en el comportamiento de un conductor) para tener en cuenta que algunos conductores se adelantan más que otros. (Ossen & Hoogendoorn, 2006).</p>
Estimulo-respuesta	<p>Treiber et al. modelaron el efecto de la memoria en la respuesta de los conductores mediante la inclusión de la variable dinámica nivel subjetivo de servicio, la cual describe la aclimatación de los conductores al tráfico circundante. (Treiber & Helbing, 2003).</p> <p>También se realizó la inclusión de importantes aspectos del comportamiento de los conductores tales como una cantidad finita de tiempos de reacción, la estimación de errores, la anticipación espacial y la anticipación temporal. (Treiber et al., 2006).</p>
Estimulo-respuesta	<p>Mediante el uso de formulaciones genéricas se realizaron análisis de la inestabilidad lineal estándar de los modelos de seguimiento vehicular. (Wilson, 2008).</p>
Estimulo-respuesta	<p>Se hicieron actualizaciones relacionadas con la teoría trifásica, en donde se expone que el tráfico se encuentra descrito en tres fases (flujo libre, flujo sincronizado y atasco amplio en movimiento) a diferencia de las dos fases convencionales (flujo libre y tráfico congestionado) (Kerner, 2009; Kerner & Klenov, 2006; Kerner & Rehborn, 1996).</p>

Nota: Elaboración propia.

Algunos de los simuladores de tráfico modernos y eficientes emplean los modelos matemáticos anteriormente descritos, para citar algunos ejemplos se pueden mencionar el simulador AIMSUN, el cual emplea el modelo de distancia de seguridad de Gipps desarrollado en

1981; el simulador VISSIM, el cual incorpora el modelo psicofísico propuesto por Wiedemann en 1974 y el simulador MITSIM, que emplea como base el modelo de estímulo respuesta GHR propuesto en 1961. A pesar de que los modelos matemáticos empleados por los simuladores son diferentes, se ha demostrado que los resultados obtenidos son bastante similares (Olstam & Tapani, 2004).

2.4.2. Modelos de cambio de carril

Entendiendo cambios de carril como un cambio deliberado y sustancial en la posición lateral de un vehículo (Chovan et al., 1994) o como una maniobra de conducción para mover un vehículo de un carril a otro que cuenta con la misma dirección de viaje (Fitch et al., 2009).

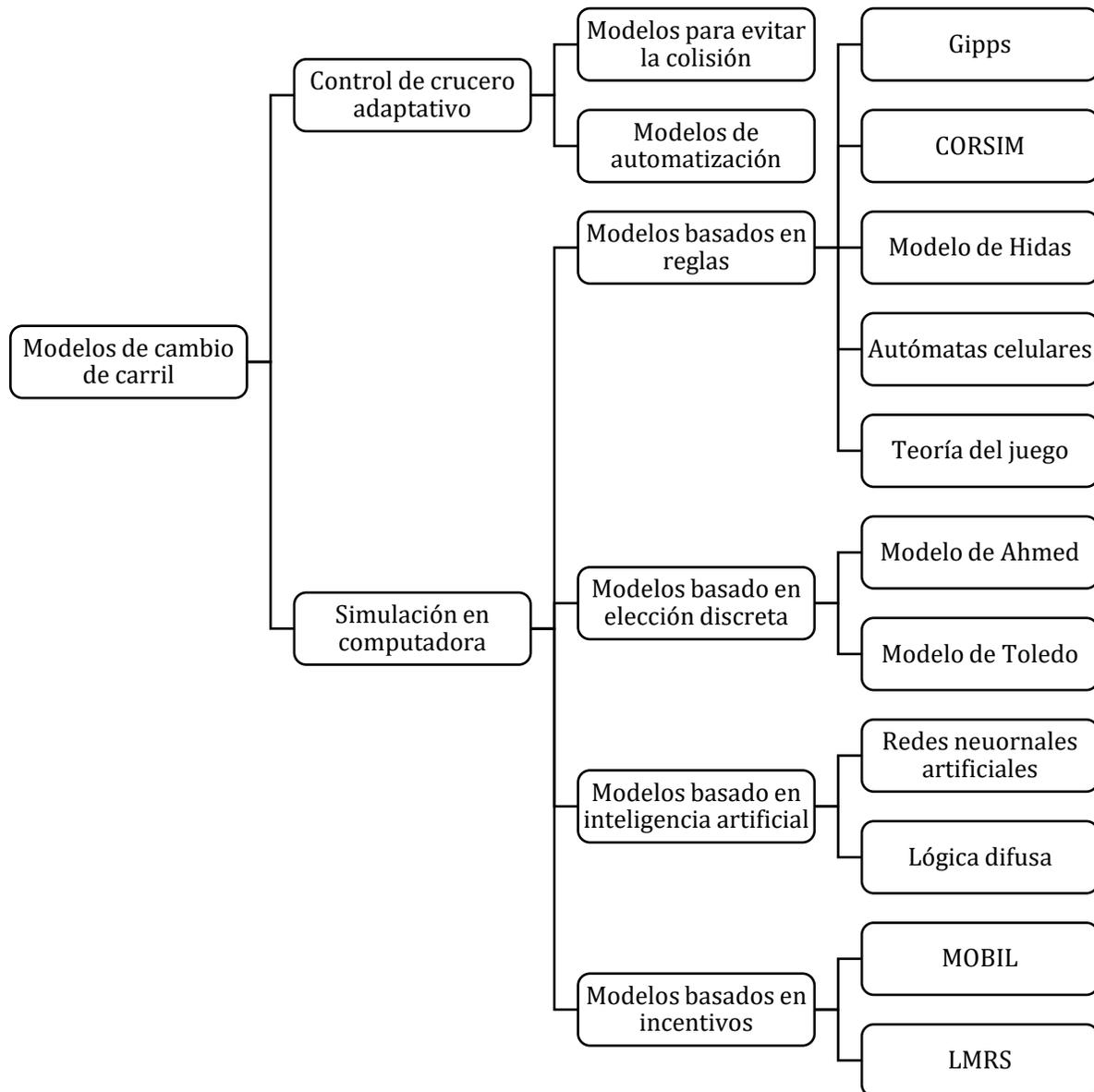
Los modelos de cambio de carril permiten, entre otros, analizar las maniobras y los comportamientos del conductor al momento de realizar cambios de carril. Estas condiciones generan un impacto fundamental en las características tanto macroscópicas como microscópicas de los flujos de tráfico debidos a la interferencia con los vehículos adyacentes (Huang et al., 2019; Moridpour et al., 2010). Estos modelos pueden representar diferentes parámetros tales como: seguridad, accidentalidad, riesgos de conducción, tiempo de viaje, comodidad de los usuarios, congestión por cuellos de botella, etc., permitiendo su aplicación a una creciente variedad de estudios de tráfico y transporte como por ejemplo: Desarrollo de políticas de gestión de tráfico (Moridpour et al., 2010), análisis de capacidad (Huang et al., 2019; Yunnus et al., 2021), estudios de seguridad (Huang et al., 2019; Yunnus et al., 2021), (Huang et al., 2019; Moridpour et al., 2010; Rahman et al., 2013).

Durante las últimas décadas se han desarrollado numerosos modelos que pretenden reflejar las condiciones de la realidad teniendo claras las implicaciones y limitaciones de cada uno de ellos. Como complementan los autores de (Moridpour et al., 2010; Rahman et al., 2013), el comportamiento asimétrico de los cambios de carril, la variación del comportamiento de aceptación de brecha bajo diferentes condiciones de tráfico, los espacios mínimos dependientes de la velocidad del vehículo en cuestión y los adyacentes a este entre otros, son algunos de los motivos que dificultan la representación de estos modelos. A estas condiciones cabe añadirle diversos factores tales como la distracción del conductor, las condiciones del ambiente que lo rodea, el diseño geométrico o factores propios del tramo que transita. Dichos factores no se encuentran debidamente considerados en algunos de los modelos existentes, generando así, la necesidad de recopilar información microscópica detallada sobre la trayectoria del vehículo con el fin de desarrollar, calibrar y validar nuevos modelos que reflejen de manera adecuada las condiciones experimentadas en la realidad (Rahman et al., 2013).

Zheng (Zheng, 2014) establece que los modelos de cambio de carril pueden clasificarse en dos grupos principales: los modelos del proceso de toma de decisiones durante el cambio de carril (LCD), en los cuales se analiza como un conductor realiza la maniobra de cambio de carril cuando se enfrenta a objetivos conflictivos; y los modelos de impacto (LCI), en los cuales se analiza el impacto del cambio de carril en los vehículos circundantes. Desde otra perspectiva, Rahman et al. (Rahman et al., 2013) propone una clasificación de los modelos de cambio de carril tal como se presenta en la Figura 2.

Figura 2

Clasificación de tipos de modelos de cambio de carril según Rahman et al.



Nota: Elaboración propia con base en (Rahman et al., 2013).

Los modelos de control de cruceo adaptativo se centran en el desarrollo de modelos de asistencia a los conductores, mientras que los modelos de simulación por computadora se

enfocan en la representación del comportamiento de los conductores, a su vez, estos modelos hacen parte de los modelos del proceso de toma de decisiones durante el cambio de carril (LCD), por lo tanto, el enfoque principal de este documento serán los modelos de simulación en computadora. En la Tabla 3 se describen los modelos de cambio de carril en simulación por computadora más relevantes hasta la fecha.

Tabla 3
 Descripción de modelos de cambio de carril

Modelo	Descripción	Variables
Modelo de Gipps	Describe las decisiones de cambios de carril y la ejecución de estas como el resultado de considerar tres factores: la posibilidad de cambiar de carril de forma segura, la necesidad de hacer el cambio de carril y si es deseable o conveniente realizar el cambio. El punto de partida del modelo de cambio de carril fue el modelo de seguimiento vehicular de Gipps, en el cual se busca tener una velocidad segura con respecto al vehículo precedente (Gipps, 1986).	$v_n(t + T)$: máxima distancia de seguridad para el vehículo n respecto al vehículo precedente en el tiempo (t+T) b_n : frenado más severo que el conductor está dispuesto a realizar. T : tiempo entre cálculos consecutivos de velocidad y posición. $x_n(t)$: localización de la parte delantera del vehículo n en el tiempo t. s_{n-1} : longitud efectiva del vehículo n-1. \hat{b} : estimativo de b_{n-1} empleado por el conductor del vehículo n.

$$v_n(t + T) = b_n T + [b_n^2 T^2 - b_n (2\{x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)\} - v_n(t)T - v_{n-1}(t)^2 / \hat{b})]^{1/2}$$

Modelo de la teoría del juego

Se propuso un modelo teórico de juegos en el cual se describe el comportamiento e interacción entre un par de vehículos que se incorporan a la carretera y otros vehículos que la atraviesan (Kita, 1998). Este modelo contaba con la limitante de que la exactitud del modelo no podría ser examinada mediante la comprobación con datos observables por causa de la existencia de múltiples equilibrios, por lo tanto, se desarrolló un método en el cual se especificaba un equilibrio único (Kita & Fukuyama, 1999). Este último método poseía la limitante de que las funciones de utilidad de los conductores que se incorporan y los que se atraviesan se determinaban de forma separada, despreciando el hecho de que ambos grupos se encuentran en una situación de juego, esta limitante fue abordada posteriormente empleando un método para estimar funciones de compensación de los conductores (Kita & Fukuyama, 2002). El modelo inicialmente propuesto se presenta a continuación:

$$\begin{array}{cc}
 [X1] & I \quad II \\
 & \begin{array}{l} 1 \{p_{11} \quad p_{12}\} \\ 2 \{p_{21} \quad p_{22}\} \end{array} \\
 [X2] & I \quad II \\
 & \begin{array}{l} 1 \{q_{11} \quad q_{12}\} \\ 2 \{q_{21} \quad q_{22}\} \end{array} \\
 m = & \{1: \text{incorporación}, 2: \text{paso}\} \\
 n = & \{I: \text{ceder}, II: \text{no ceder}\}
 \end{array}$$

X1: jugador 1.
 X2: jugador 2.
 m: estrategia del jugador 1.
 n: estrategia del jugador 2.

Modelo probabilístico de Ahmed

Ahmed (K. Ahmed et al., 1996; K. I. Ahmed, 1999) modeló las decisiones de cambio de carril con base en un marco de elección discreta en el cual se contemplaban tres etapas: la decisión de realizar o no el cambio de carril, la elección del carril y la aceptación de una brecha suficiente para ejecutar el cambio de carril. Además, propuso las siguientes categorías para las maniobras de cambio de carril:

- Cambio de carril obligatorio (MLC): Se presenta cuando un conductor se ve obligado a cambiar su carril actual.
- Cambio de carril discrecional (DLC): Se

LC: MLC, DLC, FM.
 $P_t(LC|v_n)$: probabilidad de que un conductor n realice MLC, DLC o FM en un tiempo t .
 X_n^{LC} : vector de variables explicativas que afectan el cambio de carril.

presenta cuando un conductor está inconforme con las velocidades del carril en circulación. β^{LC} : corresponde al vector de parámetros.

- Fusión forzada (FM): Se presenta cuando el conductor crea una brecha para realizar el cambio de carril en un contorno de tráfico congestionado. v_n : término aleatorio específico del conductor.
 α^{LC} : parámetro de v_n .

La probabilidad de que un conductor realice un cambio de carril bajo las condiciones anteriormente descritas se rige por la siguiente expresión:

$$P_t(LC|v_n) = \frac{1}{1 + \exp(-X_n^{LC}(t)\beta^{LC} - \alpha^{LC}v_n)}$$

Toledo desarrollo un modelo probabilístico de decisiones de cambio de carril que permite al conductor considerar tanto MLC como DLC al mismo tiempo, presentando similitudes con el modelo de Ahmed. En este modelo, el conductor debe realizar una secuencia de aceleraciones y desaceleraciones para moverse al carril objetivo después de haber seleccionado un carril y haber encontrado la brecha de tamaño suficiente (Toledo et al., 2007); dichos lapsos de adelanto/rezago se definen como aceptables, o no, mediante una probabilidad condicional.

Modelo de Hidas

Con base en la observación y análisis de datos recolectados a partir de videgrabaciones, se propuso un nuevo modelo en el cual las maniobras de cambio de carril de los conductores se clasifican en maniobras libres, forzadas y cooperativas. Los resultados permitieron identificar que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento individual de los vehículos en términos de velocidad, aceptación de espacios y resolución de conflictos (Hidas, 2005). El espacio objetivo de adelanto y el espacio objetivo de retraso en una maniobra de cambio de carril se calculan como se presenta a continuación:

$$g_l = g_{0l} - \left(v_s - \frac{b_s}{2}\right) + v_l$$

g_l : espacio objetivo de adelanto.

g_f : espacio objetivo de retraso.

g_{0l} : espacio objetivo de adelanto al inicio del cambio de carril.

g_{0f} : espacio objetivo de retraso al inicio de cambio de carril.

v_s, v_l, v_f : velocidades del vehículo sujeto, del vehículo de

$$g_f = g_{of} - \left(v_f - \frac{b_f}{2} \right) + \left(v_s - \frac{b_s}{2} \right)$$

adelanto y del
vehículo
respectivamente.

DT : tipo de conductor.

s : distancia del
vehículo que cambia
de carril y del vehículo
que le precede en el
carril actual.

v_f : velocidad actual de
los vehículos que
cambian de carril.

v_l : velocidad actual
del vehículo que
circula por delante en
el carril actual.

v_f^{des} : velocidad
esperada del vehículo
que cambia de carril.

h_{max} : tiempo máximo
de avance del vehículo
que cambia de carril.

h_{min} : tiempo mínimo
de avance del vehículo
que cambia de carril.

d : desaceleración
aceptable del vehículo
que cambia de carril.

d_{min} : mínima
desaceleración
aceptable del vehículo
que cambia de carril.

d_{max} : máxima
desaceleración
aceptable del vehículo
que cambia de carril.

Este modelo fue desarrollado por Halati (Halati et al., 1997) y posteriormente incorporado en el simulador CORSIM (CORridor SIMulation), en el modelo los cambios de carril se clasifican en cambios de carril obligatorios (MLC), cambios de carril discrecionales (DLC) y cambios de carril aleatorios (RLC). El modelo principal se compone de dos submodelos:

- ETSIM: se emplea para modelar carreteras de ciudad. En este tipo de modelo se fundamenta en tener en cuenta el umbral de tolerancia de los diferentes tipos de conductor.

Modelo
CORSIM

$$DT > 9 * \frac{[s - 2 * (v_f - v_l)] / v_f^{des} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}$$

- REESIM: se emplea para modelar autopistas. Este modelo se compone de tres factores: el motivo de cambio, el beneficio del cambio y la urgencia de realizar el cambio.

$$d = \begin{cases} d_{min} & , u < (1 - 0.05c) \\ d_{min} + (d_{max} - d_{min}) \frac{u + 0.05c - 1}{0.05c} & , u \geq (1 - 0.05c) \end{cases}$$

Autómatas
celulares

Este modelo parte del modelo básico de Nagel & Schreckenberg (Nagel & Schreckenberg, 1992), En este tipo de modelo se asume que el vehículo realiza el cambio de carril siempre y cuando se verifiquen que las velocidades en el carril actual y el objetivo son favorables, y que se disponga de espacio suficiente para la maniobra. Estas condiciones dependen del número de celdas vacías, tanto en el carril actual como en el objetivo, del número de celdas hacia atrás en el carril objetivo, de la velocidad del vehículo en el tiempo y la velocidad máxima permitida (Nagel et al., 1998). Con el paso del tiempo, diferentes autores realizaron propuestas de nuevos modelos en los que cada vez se consideraron nuevos aspectos relevantes para mejorar la precisión de estos, por ejemplo, (Benjaafar et al., 1997) postulo un modelo en el cual se abordaban condiciones de densidad variable, (Zhu et al., 2009) postularon un modelo para representar el cambio de carril en autopistas con bloqueos parciales. Das & Chattaraj (A. K. Das & Chattaraj, 2022) argumentan que la mayoría de los modelos no contemplan características propiamente microscópicas y que algunas representaciones se alejan de la realidad, por lo cual formularon su propio modelo basado en la siguiente formulación.

$$B = C_1 + C_2 v \quad G_p = G_a - B$$

$$v = v * \left(\frac{G_a}{B}\right)^n \quad v^2 - u^2 = 2aS$$

B : espacio delantero de seguridad.

G_p : El espacio utilizado por el vehículo para su movimiento seguro.

G_a : distancia entre el parachoques trasero del vehículo principal y el parachoques delantero del vehículo siguiente.

C_1, C_2 : constantes de calibración.

v : velocidad del vehículo en el paso de tiempo actual.

u : velocidad del vehículo en el paso de tiempo anterior.

a : aceleración.

S : distancia recorrida.

Modelo
basado en
inteligencia
artificial

Están completamente basados en datos y requieren información de tráfico recopilada en campo para aprender el comportamiento del conductor con el fin de adquirir la capacidad de replicar dicha conducta y utilizarla en las nuevas situaciones del modelo que permitan construir predicciones (Dumbuya et al., 2009; Gurney, 1997). En el trabajo de Dumbuya como punto de partida se empleó el simulador de conducción TRL para estudiar el cambio

Modelo basado en lógica difusa	<p>de carril en autopistas, se definieron datos y parámetros de entrada como la dirección de conducción inicial, la velocidad esperada y el carril inicial; posteriormente se entrenó la red neuronal propuesta (Agente de Conducción Neural) y finalmente se obtuvieron resultados concluyentes que indican que se puede predecir el comportamiento de cambio de carril con una gran precisión. El nivel de precisión depende del entrenamiento de la red neuronal con una gran cantidad de datos.</p> <p>La lógica difusa posee la capacidad de simular el cerebro humano para aplicar un razonamiento basado en reglas (Zhang et al., 2015).</p> <p>McDonald fue uno de los pioneros en modelos de lógica difusa (McDonald et al., 1997), propuso un modelo que se fundamenta en el uso de dos bases de reglas diferentes para el cambio de carril: cambio de carril al lado opuesto (LCO) y cambio de carril al lado cercano (LCN). En la base LCO se cuenta con dos variables de entrada: el beneficio de adelantar y la oportunidad, estas variables se relacionan en un conjunto difuso con variables de salida, por ejemplo: <i>“Si el beneficio de adelantar es alto y la oportunidad es buena, la intención de LCO es alta”</i>. Por otra parte, en la base LCN las variables de entrada son: presión desde atrás y satisfacción en los espacios en el carril cercano.</p> <p>Durante los últimos años se han desarrollado gran cantidad de modelos basados en lógica difusa (S. Das et al., 1999; Ma, 2006; Moridpour et al., 2009; Wu et al., 2000), sin embargo, la definición de los conjuntos difusos son un reto y más aún la calibración de este tipo de modelos (Ross, 2010).</p>	\tilde{a}_n : desaceleración del sucesor n. b_{safe} : límite de seguridad.
Modelo de minimización de frenado global inducido por el cambio de carril (MOBIL)	<p>La base de estos modelos parte de dos criterios primordiales que a su vez fundamentan las normativas que rigen las simulaciones de tráfico multicarril en IDM (modelo de conductor inteligente) (Kesting et al., 2007; Treiber & Helbing, 2002). Los criterios son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Criterio de incentivo: Mide que tan atractivo es 	

un carril en función de su utilidad.

- Criterio de seguridad: Asociado al riesgo que conlleva el cambio de carril.

Partiendo de los criterios se desglosan reglas que se aplican a la simulación de tráfico multicarril en el modelo de conductor inteligente (IDM):

- Reglas simétricas: se aplican cuando la maniobra de cambio hacia el carril derecho no está prohibida. El criterio de seguridad garantiza que después del cambio de carril la desaceleración del sucesor \tilde{a}_n en el carril objetivo no exceda un límite de seguridad b_{safe} .

$$\tilde{a}_n < -b_{safe}$$

El criterio de incentivo incluye a los vecinos inmediatamente afectados, para esto se incluye un factor de cortesía P, el cual determina hasta qué punto estos vehículos influyen en la decisión de cambio de carril.

- Reglas asimétricas: se emplean cuando la maniobra de cambio hacia el carril derecho está prohibida. Este tipo de reglas se emplean específicamente en muchos países europeos en los cuales el cambio al carril derecho es prohibido a menos que exista congestión o una obligación inminente.

Los autores de (Schakel et al., 2012) presentaron un modelo basado en el deseo de los conductores a cambiar de carril. Este deseo abarca criterios y elementos de otros modelos como la combinación de los incentivos de la ruta, la velocidad, y el de mantenerse a la derecha. El deseo de cambiar de un carril i a un carril j que surge de diferentes incentivos se combina en la siguiente expresión.

$$d^{ij} = d_r^{ij} + \theta_v^{ij} * (d_s^{ij} + d_b^{ij})$$

El deseo de cambio puede variar entre valores de 1 y -1, en el cual los valores negativos indican que no se desea un cambio de carril. En general el comportamiento de los conductores se rige bajo el deseo total determinado. La clasificación de los

d^{ij} : deseo combinado de cambiar de carril desde i a j.

d_r^{ij} : deseo de seguir una ruta.

θ_v^{ij} : incentivos voluntarios (discrecionales).

d_s^{ij} : deseo de obtener velocidad.

d_b^{ij} : deseo de mantenerse a la derecha.

Modelo de cambio de carril con relajación y sincronización (LMRS)

cambios se encuentra fundamentada en el comportamiento de los conductores, dentro de los cuales se encuentran:

- Cambios de carril libres (d_{free})
- Cambios de carril sincronizados (d_{sync})
- Cambios de carril cooperativos (d_{coop})

Estas clasificaciones se obtienen con base en los siguientes umbrales.

$$0 < d_{free} < d_{sync} < d_{coop} < 1$$

Nota: Elaboración propia.

Tal como se ha visto, el creciente interés en el estudio de modelos de microsimulación de tráfico ha resultado en una gran cantidad de modelos que pueden representar en mayor o menor medida el comportamiento de un conductor sobre una vialidad bajo ciertas condiciones muy específicas.

A pesar de estos notables esfuerzos aún queda una gran cantidad de retos por afrontar desde el punto de vista investigativo, esto teniendo en cuenta que en los modelos anteriormente abordados se desprecian aspectos que inciden en las maniobras de cambio carril o de seguimiento vehicular, aspectos como las características geométricas del tramo vial donde se realice la maniobra, el estado físico del pavimento y las condiciones climáticas también pueden incidir en la forma como un conductor intenta realizar este tipo de maniobras, adelantar un vehículo sobre pavimento seco nunca será lo mismo que adelantarlo sobre pavimento mojado, existen condiciones de seguridad que en la vida real se tienen en cuenta, pero que son despreciadas aún en los modelos existentes. Otro aspecto que podría ser notablemente relevante en los modelos son las

características propias del vehículo que realiza la maniobra, seguramente será mucho más difícil realizar un adelantamiento para un vehículo de bajas especificaciones sobre un tramo vial ascendente y posiblemente no es lo mismo adelantar un vehículo liviano que adelantar un vehículo de mayor longitud y dimensión como un camión de cinco ejes. La tecnología del vehículo juega un papel fundamental, ya que, con los avances diarios, los procesos de aceleración en unos cuantos segundos hacen que la maniobra de adelantamiento sea más riesgosa para algunos vehículos. Otros factores relevantes que aún pueden ser incluidos en el desarrollo de los diferentes modelos son la normativa y reglamentación propia de cada ciudad o zona a donde pertenezca el sector que se micro simula, por ejemplo, los límites de velocidad pueden influir en las limitaciones propias de cada modelo, incluso el comportamiento y estilo de conducción propio de cada persona pueden ser parámetros para considerar de manera desagregada para hacer modelos más aproximados a la realidad.

Las futuras investigaciones encaminadas a refinar los modelos deberán contar con grandes cantidades de información de campo, por lo cual los sistemas de recolección y almacenamiento deben ser propicios para esta labor. Adicionalmente, debido a la gran cantidad de parámetros y la complejidad de los modelos matemáticos, será de vital importancia contar capacidades de cómputo que permitan realizar simulaciones en diferentes escalas.

2.4.3. Simulación Microscópica a Gran Escala

Durante las últimas décadas se ha venido adquiriendo especial interés en el uso de la microsimulación de transporte como una herramienta de gran potencial en la planificación de

proyectos de Ingeniería de Transporte (Valladares, 2016), sin embargo, su uso también ha dejado al descubierto la necesidad de que cada vez más los centros urbanos requieren información más detallada sobre la oferta y demanda de transporte que circula por sus redes viales a fin de mejorar los procesos de toma de decisiones. Las condiciones de tráfico han cambiado de forma considerable debido no solo al crecimiento del parque automotor, sino también al comportamiento del transporte de personas y al surgimiento de servicios cada vez más diferentes y complejos de modelar en un nivel Macroscópico como el desarrollo de servicios de préstamo de bicicletas, servicio de vehículos compartidos (vehículos particulares “Informales” y Uberpool, ciclos de semáforos que varían con el tiempo en intersecciones cercanas (ola verde) o la cantidad de flujo vehicular (semáforos inteligentes) y aplicaciones que permiten identificar en tiempo real la ruta óptima a seguir (Waze y Google Maps). Ante este panorama surge la necesidad de contar con modelos de simulación de tráfico cada vez más grandes y detallados, que representen de forma precisa la realidad, que permitan obtener resultados más confiables a la hora de tomar decisiones que pueden afectar de forma directa la economía y calidad de vida.

Los modelos de microsimulación de tráfico a gran escala son un tema relativamente reciente, esto debido principalmente a las limitaciones de cómputo de algunas décadas atrás. En la actualidad los modelos de microsimulación a gran escala son empleados para realizar análisis específicos de gran interés que son influenciados de forma directa por un tráfico cada vez más dinámico, datos como por ejemplo la cantidad de emisiones de CO₂ (Makridis et al., 2020), rutas posibles de evacuación empleando transito ferroviario (VanLandegen & Chen, 2012) y evaluación del impacto de incidentes de tráfico durante las evacuaciones de huracanes (Robinson et al., 2018) entre muchos otros.

Hasta el día de hoy se han realizado numerosos estudios de simulación a gran escala en ciudades de diferentes extensiones como por ejemplo en ciudades de áreas pequeñas como Zúrich (Suiza), Ámsterdam (Reino de los Países Bajos), Paris (Francia) y Fresno (Estados Unidos); hasta sectores de gran extensión como el sureste de Florida (Estados Unidos), incluidos los condados de Palm Beach, Broward y Miami-Dade (Mtoi et al., 2014) o toda Suiza (Schweizer et al., 2018).

A pesar de que existen diversos estudios de escenarios de microsimulación a gran escala, en estos estudios, los escenarios simulados no han sido sometidos a un proceso riguroso de validación en el que se comparen flujos vehiculares por modo simulados con datos reales, se evalúe la correlación entre los datos reales y simulados, se verifique la pendiente y el intercepto de la regresión de calibración, y se evalúe el estadístico GEH para datos reales y simulados; por otra parte, nunca se ha publicado una simulación validada a gran escala que incluya modos activos de transporte (caminata y ciclistas) (Schweizer et al., 2021).

La construcción de modelos micro a gran escala podrían tener diversas aplicaciones actualmente sin explotar y que pueden ser de gran utilidad para la sociedad en general, como el desarrollo de estrategias de enrutamiento para una red de transporte en caso de evacuaciones y otras emergencias; evaluación del rendimiento de todo el sistema de transporte de una ciudad para una amplia gama de escenarios y eventos especiales; evaluación de los beneficios ambientales de los programas de mejora del transporte cuando se vinculan a los modelos de emisiones entre otras (Zhao & Sadek, 2012). Por lo tanto, el estudio de la Microsimulación a gran escala resulta de interés en cuanto a la evaluación de escenarios que representen los complejos y diversos patrones de viajes de la realidad de nuestros tiempos y futuros. La tendencia del parque automotor seguirá creciendo

durante los próximos años, lo cual requiere de modelos detallados que permitan analizar la nueva gama de situaciones de transporte conflictivas que puedan surgir.

A pesar de sus posibles bondades, históricamente la mayoría de los modelos de Microsimulación de tráfico se han centrado en una escala pequeña de redes de transporte, esto debido principalmente a que los modelos micro a gran escala requieren gran cantidad de información de oferta y demanda de transporte, la cual es de difícil acceso debido a los altos costos de registro y, por esta razón se termina limitando su uso a pesar de los beneficios que se pueden lograr con su aplicación. Generalmente esta información puede obtenerse a partir de encuestas domiciliarias y registros de conteos vehiculares, pero, estos métodos suelen ser muy costosos, lo cual reduce la frecuencia con la cual se recolecta esta información y el tamaño de la muestra seleccionada, por lo cual los datos suelen estar desactualizados y no contienen el suficiente nivel de detalle para un análisis muy específico (Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2020).

En este orden de ideas, en el presente proyecto se busca estudiar la ventajas y desventajas en el uso de técnicas de microsimulación a gran escala respecto a la mesosimulación y macrosimulación y la identificación de oportunidades que permitan un mejor aprovechamiento de la microsimulación para análisis más amplios en zonas geográficas extensas. Esto teniendo en cuenta las problemáticas anteriormente planteadas, las grandes cantidades de información requeridas, las formas en las que esta información se recolectó y procesó en un escenario de caso de estudio y las diferencias existentes entre los resultados de cada una de las escalas simuladas.

3. Escenario de simulación

Para el desarrollo de este trabajo se optó por emplear un escenario de microsimulación preexistente de la ciudad de Bolonia, Italia, esto se debe a la falta de información que se requiere para la construcción de un escenario de este nivel para una ciudad colombiana, además de la gran dificultad en términos de tiempo y costo que representa la recolección de la gran cantidad de información que va desde información topológica de la red de transporte, tiempos semafóricos, demanda de transporte, zonificación y el complejo proceso de calibración de un escenario a gran escala entre otras cosas. Por otra parte, el intercambio de información con los investigadores de la universidad de Bolonia permitió estrechar relaciones académicas y generar oportunidad para el desarrollo de una pasantía de investigación en el contexto del presente trabajo.

El escenario de microsimulación a gran escala del Área Metropolitana de Bolonia ha sido construido, calibrado e investigado durante los últimos años por la universidad de Bolonia, Italia. La construcción de este tipo de escenarios demanda una gran cantidad de recursos humanos y recursos de cómputo. Para la construcción de este escenario ha sido imprescindible contar con grandes cantidades de información referente a los patrones de desplazamiento de la población (aproximadamente 1 millón de habitantes en el área metropolitana y 308,000 habitantes en la ciudad de Bolonia). A continuación, se describen los elementos más relevantes de la construcción del escenario de Bolonia.

3.1.Red de transporte

La red de transporte del escenario a gran escala fue descargada de Open Street Map (OSM) en un formato compatible con SUMO, esta red de transporte cuenta con atributos asociados para

cada uno de los tramos viales; posteriormente la red fue editada de forma manual empleando imágenes satelitales de fondo, información de Google Maps e inspecciones de campo. Una gran cantidad de inconsistencias en las conexiones viales fueron identificadas y corregidas durante el proceso de edición. El sistema de semaforización del escenario se editó de forma manual con base en los planes semafóricos existentes de la ciudad de Bolonia.

La zona de la ciudad de Bolonia incluyendo los municipios aledaños que la rodean constituyen el área central de simulación, la cual cuenta con una red de transporte que tiene un alto nivel de detalle e incluye ciclorrutas y senderos peatonales; mientras que el sector externo a la ciudad de Bolonia constituido como el Área Metropolitana de Bolonia es el área externa de simulación y cuenta con un nivel de detalle inferior ya que solo se contiene las vías principales de conexión (ver Figura 3). El área de simulación externa es de vital importancia a fin de tener en cuenta la demanda externa que sale o ingresa a la zona central de simulación. Las Zonas de Análisis de Transporte (ZAT) se derivaron del censo nacional del 2001 (Istituto Nazionale di Statistica, 2004), como es de esperarse estas zonas son más pequeñas en el área central de simulación (116 zonas), mientras que en el área externa son zonas mucho más grandes (61 zonas).

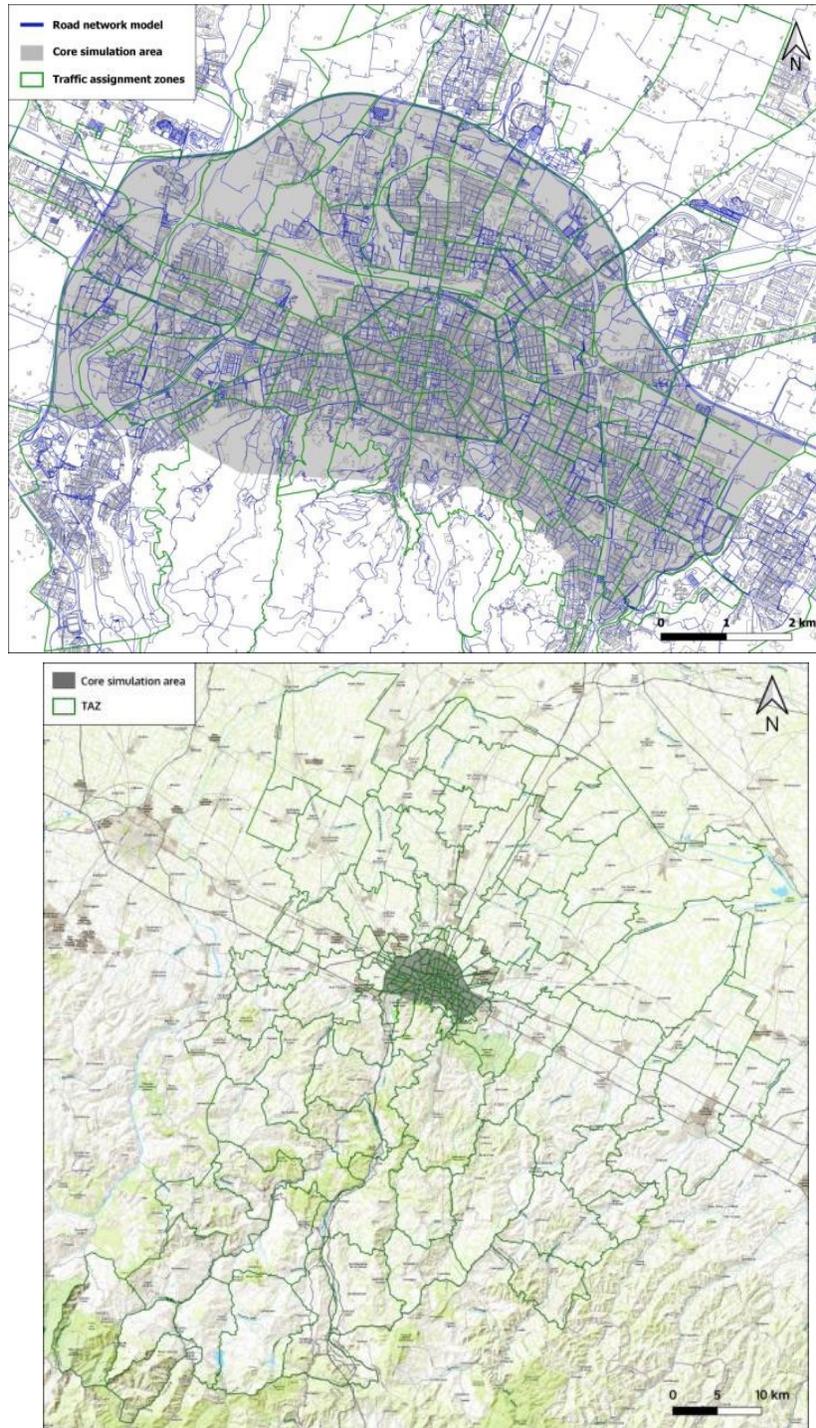
3.2. Transporte público

El transporte público se modeló para el área central de simulación, para esto, en la construcción del escenario se generaron líneas de bus basadas en los datos de la Especificación General de Alimentación en Tránsito (GTFS por sus siglas en ingles). Esta especificación permite a las agencias de transporte publico publicar sus datos de tránsito en un formato que puede ser consultado por una gran cantidad de aplicaciones de software (Mobility Data, 2022). La base de

datos almacenada incluye información geográfica de las paradas de bus, las rutas y los horarios entre otras cosas. La importación empleada permitió la simulación de transporte público para un día típico del mes de mayo del 2018 en el horario de 6:00 am a 9:00 am. El escenario total contaba con 234 líneas de bus simuladas.

Figura 3

Mapa de las áreas de simulación y las ZAT (Traffic assignment zones)



Nota: Tomado de (Schweizer et al., 2021).

3.3.Demanda de transporte

Las matrices Origen – Destino fueron inicialmente obtenidas del 14avo censo poblacional del año 2001 y posteriormente fueron actualizadas para el año 2018. Las matrices de la zona central de simulación basadas en el censo se generaron para los modos de transporte: automóviles, scooter, bus y caminata; mientras que para la zona externa de simulación únicamente se generó una matriz con el modo de transporte de automóviles, esto debido a que se consideró el automóvil como el modo de transporte típico para los viajes de larga distancia, además se consideró que los servicios de bus extra urbano tienen un impacto despreciable en los flujos de tráfico globales.

El escenario también cuenta con demanda de bicicletas, la cual fue estimada con base en trazados GPS de los ciudadanos que se recolectaron durante el Desafío de Ciclismo Europeo llevado a cabo en Bolonia en mayo de 2016. El Desafío de Ciclismo Europeo es una competencia abierta en ciudades europeas que se desarrolla anualmente en donde todas las personas que realizan viajes por motivos de trabajo, estudio u otras razones pueden participar, al final, la ciudad europea que recorra la mayor cantidad de distancia total gana premios especiales. Para llevar un registro de distancia recorrida los participantes deben usar aplicaciones móviles que permiten recolectar los trazados GPS (*The Challenge - Cycling Challenge*, 2022).

El modelo cuenta con una base de datos denominada población sintética o población virtual que fue constituida para las personas que viven en el área central de simulación. La base de datos contiene atributos para cada una de las personas que conforman la población sintética. Los atributos van desde la ubicación de origen y/o destino, patrones de desplazamiento, vehículos propios, modos preferidos, datos socioeconómicos y un conjunto de planes de viaje para el periodo

simulado. En SumoPy la población virtual es una tabla con información sobre cada miembro de la familia tal como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4
Muestra de población sintética del escenario simulado

	Name	Gender	Birth year	Occupation	1	0	Activity ID	t	time budget [s]	preferred mc	ID auto	ID bike	motorcy	lax. walk dis	ID Plan	Plan IDs
1	FRANCO	male	1994	worker	1	0	1, 51	pe	3300	passenger	1	41	12	300.000000	151	1, 101, 151
2	UGO	male	1992	student	1	0	2, 52	pe	3300	passenger	2	-	26	300.000000	152	2, 102, 152
3	CRISTIAN	male	1994	student	1	0	3, 53	pe	3300	passenger	3	-	-	300.000000	153	3, 103, 153
4	LUCIA	female	1967	worker	1	0	4, 54	pe	3300	passenger	4	-	-	300.000000	154	4, 104, 154
5	ALDO	male	1952	pensioneer	1	0	5, 55	pe	3300	passenger	5	-	29	300.000000	155	5, 105, 155
6	GIUSEPPE	male	1958	worker	1	1	6, 56	pe	3300	passenger	6	-	15	300.000000	156	6, 106, 156
7	LISA	female	1998	student	1	0	7, 57	pe	3300	passenger	7	14	-	300.000000	157	7, 107, 157
8	ANALISA	female	1945	pensioneer	1	0	8, 58	pe	3300	passenger	8	46	-	300.000000	158	8, 108, 158
9	RICO	male	1934	worker	1	0	9, 59	pe	3300	passenger	9	-	-	300.000000	159	9, 109, 159
10	STEFANO	male	1966	worker	1	0	10, 60	pe	3300	passenger	10	28	-	300.000000	160	10, 110, 160
11	CHIARA	female	1998	student	1	0	11, 61	pe	3300	passenger	11	34	-	300.000000	161	11, 111, 161
12	ANDREA	male	1977	worker	1	0	12, 62	pe	3300	passenger	12	11	-	300.000000	162	12, 112, 162
13	MERI	female	1940	pensioneer	1	0	13, 63	pe	3300	passenger	13	-	23	300.000000	163	13, 113, 163
14	GIOVANNA	female	1935	pensioneer	1	0	14, 64	pe	3300	passenger	14	-	21	300.000000	164	14, 114, 164
15	PASQUALE	male	1943	pensioneer	1	0	15, 65	pe	3300	passenger	15	12	11	300.000000	165	15, 115, 165

Nota: Elaboración propia.

En el campo “Activity ID” se listan las actividades que cada individuo puede realizar. En esta nueva tabla se lista el tiempo más temprano y más tardío de inicio de la actividad, la duración mínima y máxima, el tipo de actividad y la instalación representada por su localización en el mapa entre otros tal como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Lista de actividades de la población virtual

Activities						
	Type	ID fac.	riest hour be	test begin ho	Min. Duration	Max. Duration
			[h]	[h]	[h]	[h]
1	home	150949852	-3.500000	-2.500000	11.483334	11.500000
2	home	150950305	-3.500000	-2.500000	11.483334	11.500000
3	work	149066727	8.500000	9.500000	6.000000	9.000000
4	work	149066746	8.500000	9.500000	6.000000	9.000000
5	home	150949816	-3.500000	-2.500000	11.483334	11.500000
6	home	150950107	-3.500000	-2.500000	11.483334	11.500000
7	home	150950296	-3.500000	-2.500000	11.483334	11.500000
8	work	150952202	8.500000	9.500000	6.000000	9.000000
9	work	150818150	8.500000	9.500000	6.000000	9.000000
10	work	150818273	8.500000	9.500000	6.000000	9.000000

Nota: Elaboración propia.

La población virtual también se encuentra conformada por planes para las personas, estos planes cuentan con la información de la hora de salida, hora de llegada, duración y etapas del viaje entre otros tal como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6

Lista de planes de la población virtual

Plans									
Walkstages:walks									
	Person ID	Stategy ID	Begin time [s]	End time [s]	Estim. time [s]	Exec. time [s]	utility	Probability	Stages
5035	2464	bike	32273.000000	63766.671673	344.381897	361.000000	0.000000	1.000000	activities[13147],bikerides[664],ac
5036	2465	bike	29044.000000	58668.339844	176.515869	330.000000	0.000000	1.000000	activities[13148],bikerides[665],ac
5038	2467	bike	30773.000000	54402.675781	633.652710	1018.000000	0.000000	1.000000	activities[13150],bikerides[667],ac
5039	2468	bike	29026.000000	52525.277344	609.591736	987.000000	0.000000	1.000000	activities[13151],bikerides[668],ac
5040	2469	bike	29596.000000	59628.402344	722.583374	1128.000000	0.000000	1.000000	activities[13152],bikerides[669],ac
5042	2471	bike	32279.000000	59548.347656	738.786743	995.000000	0.000000	1.000000	activities[13154],bikerides[670],ac
5043	2472	bike	28973.000000	56162.324219	809.177490	1203.000000	0.000000	1.000000	activities[13155],bikerides[671],ac
5044	2473	bike	30214.000000	61689.828125	936.710938	1416.000000	0.000000	1.000000	activities[13156],bikerides[672],ac
5045	2474	bike	31936.000000	57009.523438	832.019897	1231.000000	0.000000	1.000000	activities[13157],bikerides[673],ac
4063	1593	motorcycle	31100.000000	55656.703125	392.275238	504.000000	0.000000	1.000000	activities[12224],walks[11277],mo
4067	1594	motorcycle	32152.000000	63302.113281	541.580078	1037.000000	0.000000	1.000000	activities[12225],walks[11279],mo

Nota: Elaboración propia.

Los planes de viaje integran información que describe cada una de las etapas, modos de transporte y duración de los viajes que desarrolla la población sintética. La construcción de la población sintética se basa únicamente en los viajes realizados del hogar al trabajo durante la hora de máxima demanda debido a la cantidad de información disponible. Las actividades de hogar y trabajo están asociadas a las construcciones importadas previamente con OSM y las caminatas se limitaron a máximo 1.5 km de distancia entre los pares Origen – Destino con el fin de evitar extensas caminatas poco realistas. (Schweizer et al., 2018).

Con el fin de que los desplazamientos fueran lo más realista posible se calculó para todo el escenario el Equilibrio de Usuario Dinámico (DUE) para todos los modos de transporte excepto bicicletas y autobuses, los cuales cuentan con horarios de recorrido fijos. Una vez transcurridas 20 iteraciones de simulación, los tiempos de viaje convergen y la congestión de tráfico inicial se redujo sustancialmente.

3.4. Calibración y validación del escenario

Como parte del trabajo complementario a la construcción del escenario de simulación de Bolonia, los investigadores propusieron un modelo de elección de plan que predice el reparto modal de los individuos de la población sintética en la simulación, de tal forma que la distribución modal de la simulación sea coherente con el reparto modal real observado (53% de la población es dueña de automóviles, el 20% de scooter y el 40% de bicicletas). Este modelo solo es aplicable a microsimulaciones y evita que la simulación se ejecute en cada una de las iteraciones, lo cual influye directamente en los tiempos de simulación. Para cada persona de la población se generan los planes de viaje viables en función de los vehículos que poseen las personas, es decir, si una

persona posee un automóvil, es factible que su viaje se realice empleando este modo de transporte, mientras que las personas que no poseen vehículos propios cuentan con dos modos que poseen, la caminata y el transporte público. En función de los porcentajes de tipos de vehículos que posee la población de Bolonia se asignaron de forma aleatoria a las personas.

El modelo de calibración se fundamenta en el uso de funciones de utilidad en las que cada función tiene un plan de viaje asignado. Las funciones de utilidad se encuentran compuestas por el tiempo de viaje (o tiempo de ejecución del plan), un valor asociado al tiempo y un parámetro específico asociado al modo. Con base en esto, la función de utilidad tiene la forma:

$$U_{s,i} = \alpha_s - \beta T_{s,i}$$

Donde,

$U_{s,i}$ es la función de utilidad de la estrategia s para la persona i .

$T_{s,i}$ es el tiempo de ejecución del plan de la estrategia s (modo de transporte) para la persona i .

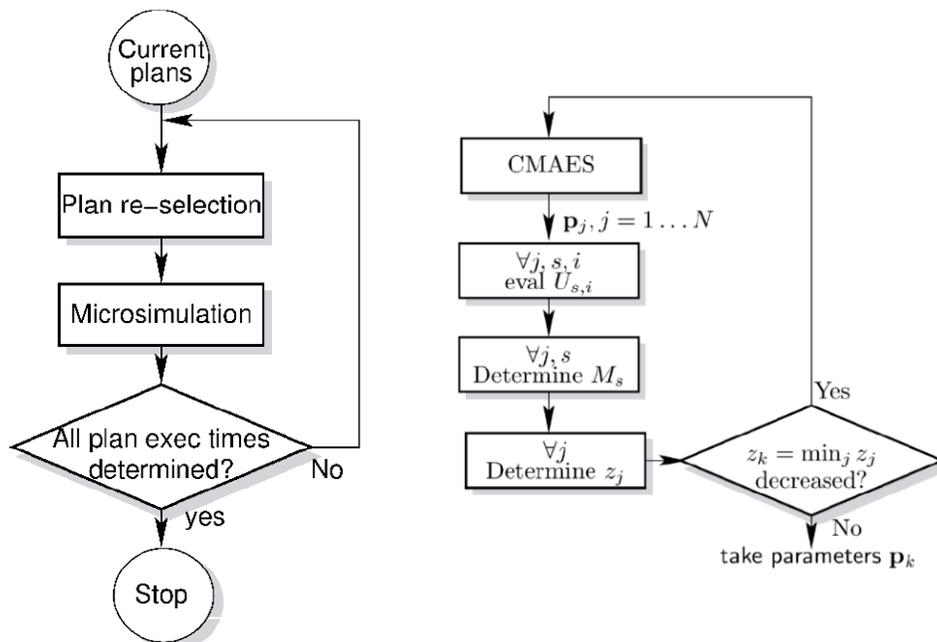
β es el valor universal del tiempo valido para todas las personas y estrategias, en este caso es igual a 0.07 €/min según (Ennio Cascetta, 2001).

α_s es un parámetro específico del modo que tiene en cuenta los atributos no observados, aquí se expresa en términos monetarios (€) e indica un precio a pagar si es negativo o un precio ganado si es positivo cuando se elige una estrategia s .

Una vez que se conocen las utilidades de todos los planes, cada una de las personas que compone la población sintética escoge el plan de la estrategia si la utilidad es la máxima de todas las estrategias factibles para esa persona.

Para calibrar el modelo los investigadores construyeron un algoritmo de minimización evolutivo que requiere la ejecución de todos los planes factibles para cada persona y el cálculo de los respectivos tiempos de ejecución de los planes ($T_{s,i}$). El funcionamiento es el siguiente: Inicialmente se determinan los tiempos de viaje para todas las estrategias de movilidad factibles (automóvil, scooter, transporte público, caminata y bicicleta) de todas las personas luego otro algoritmo elige uno de los planes en cada iteración y ejecuta la simulación con los planes seleccionados hasta que todas las estrategias han sido ejecutadas al menos una vez (ver Figura 4).

Figura 4
 Aplicación del modelo de calibración de elección de plan



Nota: Tomado de (Schweizer et al., 2021).

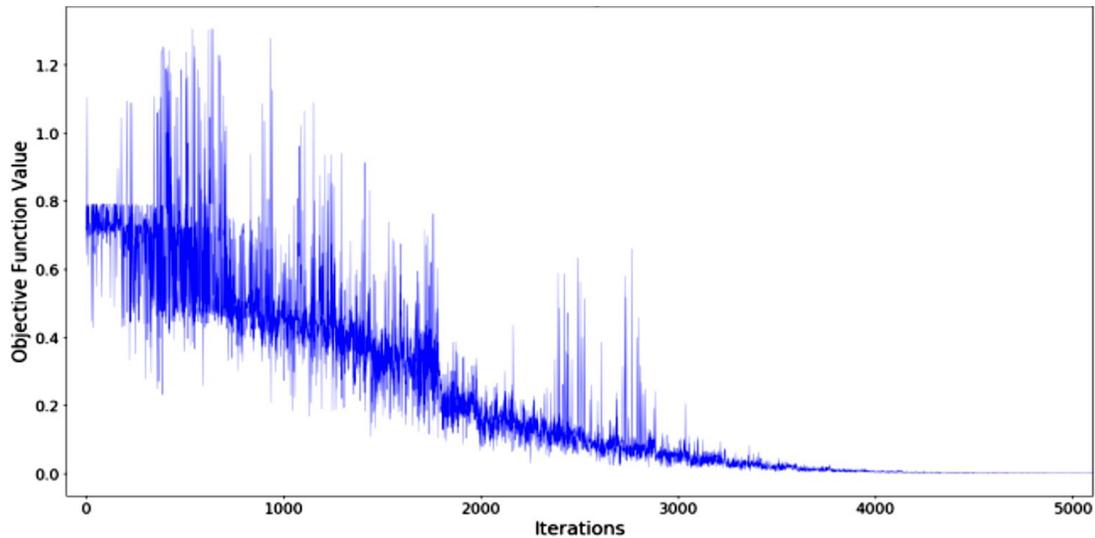
Una vez se conocen los tiempos de ejecución de cada uno de los planes, el algoritmo de minimización (calibración) se ocupa de ajustar todos los parámetros α_s de todas las estrategias de

tal forma que se minimicen las diferencias geométricas (z) entre las proporciones modales del modelo (M_s) y las proporciones observadas (O_s), de esta forma, la función objetivo tiene la siguiente forma:

$$z = \sum_{s=1}^5 |M_s - O_s|$$

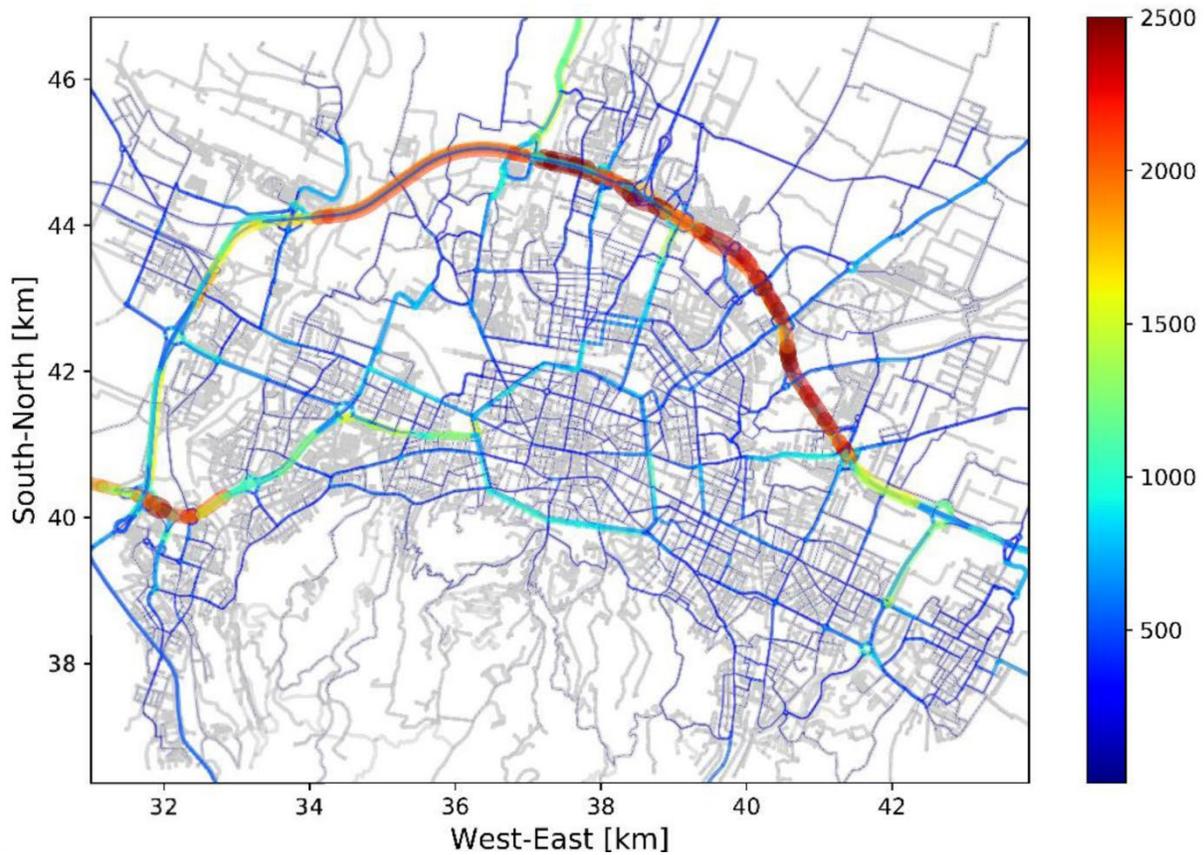
Para este fin se empleó el algoritmo estocástico CMAES, el cual determina para cada vector de parámetros la función objetivo evaluando las utilidades para cada persona y estrategia, la elección de plan para cada persona y la elección de modo. Posteriormente el algoritmo elige un conjunto de vectores nuevos de parámetros para la siguiente iteración, esto dependiendo de los vectores de parámetros obtenidos en la función objetivo anterior. El algoritmo se detiene cuando llega a una iteración en la cual no es posible reducir más el valor de la función objetivo (ver Figura 4).

En la Figura 5 se presenta la convergencia en la minimización de la función objetivo, la cual se alcanza después de las 4000 iteraciones, en donde la función objetivo comienza a tener una tendencia hacia cero. Esta convergencia se alcanza para los valores alfa de: 0.0 para los automóviles (valor de referencia para esta estrategia), -0.5604 para las bicicletas, 0.3727 para los buses, -0.0556 para la caminata y -0.0161 para el scooter. Es importante mencionar que cuando se cambia el valor de β , los parámetros calibrados también cambiarán de una forma proporcional al cambio de β , por lo cual una variación de este valor solo escala la función de utilidad sin afectar la elección de una estrategia u otra.

Figura 5*Minimización de la función objetivo*

Nota: Tomado de (Schweizer et al., 2021).

El escenario de simulación de Bolonia fue definido para la hora de máxima demanda, el cual corresponde al periodo comprendido entre las 7:00 am y las 8:00 am, para el cual se establecieron los flujos de todos los modos de transporte en la red. Para este periodo de tiempo se recolectaron los tiempos de viaje y los flujos vehiculares en toda la red de transporte. En la Figura 6 se observa que el flujo máximo es de 2500 veh/h sobre el corredor circunvalar, lo cual es coherente con la capacidad real durante la hora pico de la mañana, mientras que en el anillo interior los flujos se encuentran comprendidos entre los 1000 y los 1500 veh/h, lo cual también es muy cercano a la realidad.

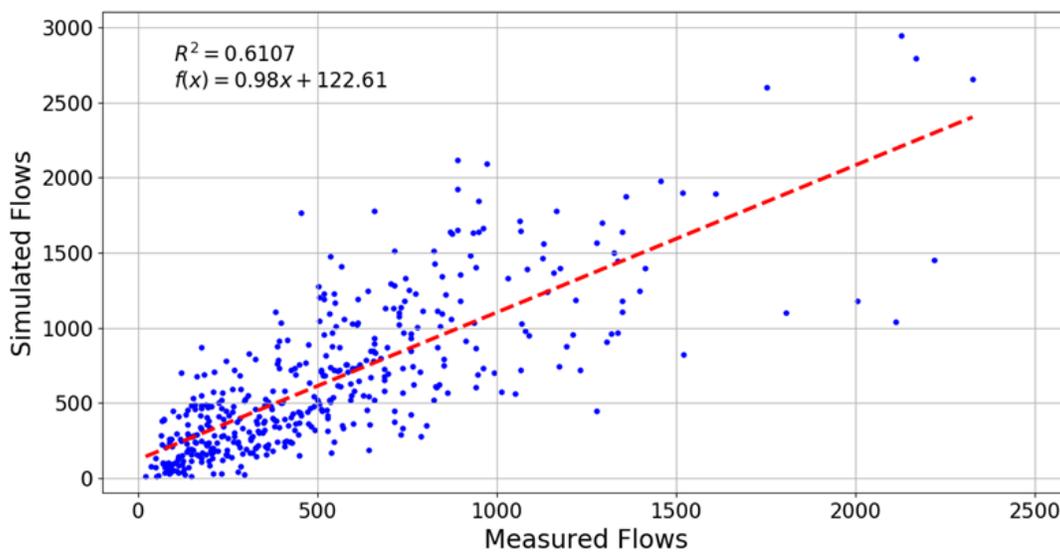
Figura 6*Flujos vehiculares simulados en el escenario de Bolonia, Italia*

Nota: Tomado de (Schweizer et al., 2021).

Los flujos vehiculares fueron comparados por los investigadores con los flujos medidos con detectores de bucles de inducción (induction loop) dispersos en toda la ciudad de Bolonia (459 detectores en total), los resultados se presentan en la Figura 7. Durante la validación del modelo se identificó que la correlación entre los flujos simulados y los flujos observados fue de 0.6107, la cual resulta inferior la correlación sugerida de 0.8 en la literatura (Ennio Cascetta, 2001). Según los investigadores (Schweizer et al., 2021), esto se explica de forma parcial debido a que las bases de datos de información con las que se validó el modelo no eran concordantes en sus fechas, por

una parte, los datos recolectados con los detectores se obtuvieron en el año 2014, mientras que el modelo fue calibrado para el año 2018. Adicionalmente, los detectores no recopilaban información de vehículos de dos ruedas, mientras que en los resultados simulados si se generaron vehículos de dos ruedas.

Figura 7
Correlación de los flujos simulados y los flujos observados



Nota: Tomado de (Schweizer et al., 2021).

En la validación del modelo se empleó el estadístico GEH es una modificación del estadístico Chi cuadrado que incorpora diferencias relativas y absolutas en comparación con los datos de flujo observados y flujos modelados. Este estadístico se representa a través de la siguiente expresión:

$$GEH = \sqrt{\frac{(Fm - Fo)^2}{0.5 * (Fm - Fo)}}$$

Donde,

F_m son los flujos modelados

F_o son los flujos observados

Los enlaces con un valor de GEH inferior a 5 representan un buen nivel de ajuste de datos, los tramos viales con valores de GEH entre 5 y 10 son considerados cuestionables y finalmente los tramos viales con GEH superiores a 10 no tienen un buen ajuste de datos (Oketch et al., 2005). Para el escenario simulado el 31% de todos los tramos viales cuentan con un GEH inferior a 5, el 28% de tramos viales se encuentran entre 5 y 10, y finalmente el 41% de tramos viales poseen un GEH superior a 10.

3.5.Delimitación del escenario

Debido a la gran envergadura del modelo de Bolonia y a las limitaciones de cómputo existentes para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se decidió delimitar el escenario de estudio inicialmente calibrado y validado, para esto la red de transporte simulada se recortó para estudiar únicamente el distrito de Corticella. Adicionalmente, una vez que el escenario de Bolonia fue calibrado y validado, se hizo una delimitación de la demanda a todo lo que entrara y saliera del distrito de Corticella, de esta forma, se garantiza que el subescenario se encuentra validado y calibrado bajo los criterios del escenario de Bolonia. En la Figura 8 se puede observar el distrito de Corticella delimitado.

Se eligió como escenario de estudio el distrito de Corticella principalmente debido a su gran cercanía al centro de Bolonia y a importantes arterias principales que comunican el Área

Metropolitana de Bolonia con otros municipios. Debido a que el escenario de Bolonia ya se encontraba calibrado y validado, en teoría el escenario de Corticella también deberá estar calibrado ya que los parámetros y la demanda no cambiaron de un escenario a otro.

Una vez delimitado el escenario de estudio se procedió a ejecutar la simulación del escenario en SumoPy. Debido a que SumoPy es un software en constante desarrollo, hubo diversos aspectos que dificultaron la generación de resultados adecuados, por lo cual fue necesario estudiar a fondo el uso de la herramienta. Una de las inconsistencias identificadas se basaba en que las velocidades de circulación vehicular eran de aproximadamente 2.88 km/h, esto se alejaba notablemente de la realidad, y se debía principalmente a la asignación errónea por parte del programa a los tramos viales que también tenían andenes, esto se solucionó modificando las velocidades de los carriles peatonales, ya que por error esta velocidad también se les asignaba a los carriles vehiculares.

Figura 8
Sector de estudio Corticella, Italia



Nota: Elaboración propia con base en Google Earth.

4. Identificación de Parámetros de simulación

Cada software de microsimulación de tráfico cuenta con su propio conjunto de parámetros en función de los modelos matemáticos de seguimiento vehicular y cambio de carril empleados (Federal Highway Administration, 2019). Pese a que los modelos matemáticos pueden ser diferentes, los parámetros de simulación son similares, pero no en su totalidad.

El escenario de simulación ha sido construido empleando la herramienta SumoPy, por lo tanto, los parámetros de simulación que son pertinentes para el presente estudio son aquellos que están integrados en los modelos matemáticos empleados por el software SUMO, sin embargo, cada simulador de transporte emplea modelos matemáticos específicos, pero los resultados obtenidos al final terminan siendo muy similares. A continuación, se describen los modelos matemáticos para cada una de las escalas de simulación y los respectivos parámetros que los conforman.

4.1. Microsimulación

4.1.1. Modelo de seguimiento vehicular

En la Microsimulación, el modelo matemático empleado por defecto es el modelo de Krauss (German Aerospace Center (DLR), 2022), el cual corresponde a una modificación del modelo definido por Stefan Krauß (Krauß, 1998). Una de las modificaciones principales consiste en que en el modelo modificado se manejan las diferentes capacidades de desaceleración de tal forma que se evita la violación de la seguridad, mientras que el modelo original permitía colisiones ocasionales cuando vehículos con diferentes capacidades de desaceleración se encontraban. Por otra parte, la fórmula de velocidad segura también se adaptó en el modelo de SUMO para reducir

los niveles de colisión garantizando siempre la distancia mínima entre el vehículo líder y el seguidor (German Aerospace Center (DLR), 2022).

El modelo ajustado de Krauss obedece al mismo principio del modelo original: los vehículos pueden conducir lo más rápido posible mientras mantienen un nivel de seguridad adecuado que se rige por la evasión de colisiones con base en la identificación de frenado del vehículo líder. Los parámetros que hacen parte del modelo de Krauss se listan y describen a continuación.

Tabla 7
Parámetros de modelo de seguimiento vehicular de Krauss

Parámetro	Descripción	Rango	Unidad
minGap	Distancia mínima cuando está parando	≥ 0	m
accel	Capacidad de aceleración del vehículo	≥ 0	m/s^2
decel	Capacidad de desaceleración del vehículo	≥ 0	m/s^2
emergencyDecel	Máxima capacidad de desaceleración de los vehículos	$\geq \text{decel}$	m/s^2
startupDelay	Tiempo de demora adicional antes de iniciar la marcha después de haber tenido que parar	≥ 0	s
sigma	Imperfección del conductor (0 indica conducción perfecta)	0 - 1	n/a
sigmaStep	Frecuencia para actualizar la aceleración asociada a la imperfección del conductor	> 0	Hz
tau	Tiempo de reacción entre el vehículo seguidor y el vehículo líder.	≥ 0	s

Nota: Elaboración propia con base en (German Aerospace Center (DLR), 2022).

4.1.2. Modelo de cambio de carril

El modelo de cambio de carril incorporado en SUMO se denomina LC2013, este modelo cumple dos objetivos principales que son: determinar la decisión de cambio de un vehículo para

un paso sencillo de simulación basado en la ruta del vehículo y las condiciones de tráfico existentes e históricas en los sectores aledaños del vehículo. Por otra parte, el modelo calcula variaciones en la velocidad del vehículo y de los vehículos que lo obstruyen, lo cual promueve la ejecución exitosa de la maniobra de cambio de carril (Erdmann, 2015).

Tabla 8
Parámetros de modelo de cambio de carril LC2013

Parámetro	Descripción	Rango	Unidad
lcStrategic	Afán por realizar cambios estratégicos de carril	0 - inf	m
lcCooperative	Disposición para realizar el cambio de carril cooperativo	0 - 1	n/a
lcSpeedGain	Afán por realizar cambios de carril para ganar velocidad	0 - inf	n/a
lcKeepRight	Afán por seguir la obligación de mantenerse a la derecha	0 - inf	n/a
lcOvertakeRight	Probabilidad de infringir las normas de adelantamiento por la derecha	0 - 1	n/a
lcOpposite	Afán por adelantar por el carril de sentido contrario	0 - inf	n/a
lcLookaheadLeft	Factor para configurar la distancia estratégica de anticipación cuando es necesario un cambio a la izquierda	0 - inf	n/a
lcSpeedGainRight	Factor para configurar la asimetría del umbral al cambiar a la izquierda o derecha para ganar velocidad.	0 - inf	n/a
lcSpeedGainLookahead	Tiempo de espera para anticipar la ralentización.	0 - inf	s
lcOvertakeDeltaSpeedFactor	Factor de diferencia de velocidad para el afán de adelantar a un vehículo vecino antes de cambiar de carril.	-1 - 1	n/a
lcKeepRightAcceptanceTime	Umbral de tiempo para cambiar la disposición a cambiar a la derecha. Valores bajos fomentan mantener cambios a la derecha.	0 - inf	s
lcCooperativeRoundabout	Factor que aumenta la disposición a moverse al carril	0 - 1	n/a

	interior en una rotonda de varios carriles.		
lcCooperativeSpeed	Factor para ajustes de velocidad cooperativos.	0 - 1	n/a
lcAssertive	Disposición a aceptar distancias inferiores en la parte delantera y trasera de un carril objetivo.	0 - inf	n/a
lcMaxSpeedLatStanding	Constante para la velocidad lateral cuando está parado.	0 - inf	n/a
lcMaxSpeedLatFactor	Factor límite de velocidad lateral en movimiento.	-inf – inf	n/a
lcMaxDistLatStanding	Distancia máxima de maniobra lateral mientras está parado.	0 - inf	m
lcSigma	Imperfección en la posición lateral.	0 - inf	n/a

Nota: Elaboración propia con base en (German Aerospace Center (DLR), 2022).

4.2.Mesosimulación

La simulación Meso emplea los mismos datos de entrada que la simulación Micro con la diferencia de que computa el movimiento vehicular incluyendo colas y ejecuciones cien veces más rápido que el modelo Microscópico (German Aerospace Center (DLR) and others, 2022b).

El modelo Mesoscópico empleado en SUMO se fundamenta en la aplicación del trabajo adelantado por Eissfeldt, Vehicle-based modelling of traffic, aquí, el modelo original se centraba en las autopistas, sin embargo, el modelo empleado en SUMO cuenta con diversas modificaciones que permiten la aplicación de simulaciones Meso en sectores urbanos (Eissfeldt, 2004).

Algunos de los parámetros vehiculares que describen las propiedades físicas de los vehículos son los únicos que afectan la simulación Mesoscópica, a continuación, se describen los parámetros en mención.

Tabla 9*Parámetros de modelo Mesoscópico*

Parámetro	Descripción	Rango	Unidad
vClass	Tipo de vehículo empleado en las vialidades.	clase	n/a
length	Longitud neta del vehículo.	>0	m
minGap	Espacio vacío después del líder.	>=0	m
maxSpeed	Velocidad máxima (técnica) del vehículo.	>0	m/s
speedFactor	Multiplicador esperado de los vehículos para los límites de velocidad del carril.	>=0	n/a
speedDev	La desviación del speedFactor.	>=0	n/a
impatience	Factor que indica la impaciencia de conductores en las intersecciones.	0 - 1	n/a
accel, decel	Indican las capacidades de aceleración y desaceleración cuando la opción de nodos microscópicos esta activa.	>=0	m/s ²
tau	Tiempo de reacción entre el vehículo seguidor y el vehículo líder.	>=0	s

Nota: Elaboración propia con base en (German Aerospace Center (DLR) and others, 2022b)

4.3. Macrosimulación

En SUMO la asignación Macroscópica se rige bajo la herramienta Marouter, en este tipo de simulación la cantidad de datos de entrada es inferior a las escalas anteriormente mencionadas, principalmente se destacan las matrices origen – destino y las rutas o viajes. Marouter realiza una asignación clásica Macroscópica en la que se emplean funciones matemáticas que aproximan los incrementos del tiempo de viaje cuando se aumenta el flujo, lo cual permite estimar una asignación iterativa sin requerir simulaciones Microscópicas que demanden mucho tiempo (German Aerospace Center (DLR) and others, 2022a).

En la siguiente tabla se describen los parámetros más relevantes en la simulación Macro de SUMO.

Tabla 10
Parámetros de modelo Macroscópico

Parámetro	Descripción	Rango	Unidad
penalty_leftturn	Penalización de giro a la izquierda para calcular tiempos de viaje cuando se buscan rutas.	≥ 0	s
penalty_paths	Penalización a las rutas existentes para encontrar rutas secundarias	≥ 0	s
maxSpeed	Velocidad máxima (técnica) del vehículo.	≥ 0	m/s
beta_gavron	Parámetro beta del modelo de elección de ruta Gawron.	≥ 0	n/a
a_gavron	Parámetro alpha del modelo de elección de ruta Gawron.	≥ 0	n/a
beta_logit	Parámetro beta del modelo de elección de ruta Logit.	≥ 0	n/a
theta_logit	Parámetro theta del modelo de elección de ruta Logit.	≥ 0	n/a
gamma_logit	Parámetro gamma del modelo de elección de ruta Logit.	≥ 0	n/a

Nota: Elaboración propia con base en (German Aerospace Center (DLR) and others, 2022a).

Medir estos parámetros de calibración de forma directa es sumamente complicado ya que muchos de ellos representan características difíciles de aislar o requieren una gran cantidad de recopilación de datos o debido al esfuerzo computacional que se requiere. Por otra parte, es importante tener en cuenta que dedicar un gran esfuerzo a la calibración potente de parámetros puede no generar un gran beneficio si se desprecian aquellos parámetros de tienen una gran influencia en la medición de tráfico de interés (Hollander & Liu, 2008).

Cuando es necesario calibrar una gran cantidad de parámetros en una red de transporte en la que se dispone de una gran cantidad de datos de puntos de medición, es recomendable emplear algoritmos de calibración automática tal como se describió en la sección Calibración y validación del escenario. Este tipo de calibraciones generalmente se acerca de una mejor manera la solución óptima, pero también dificultan el seguimiento de los cambios en el valor de cada parámetro. Según (Hollander & Liu, 2008) el analista de transporte debe elegir un conjunto de parámetros lo

suficientemente grande como para abarcar los distintos elementos que rigen el comportamiento del sistema, pero lo suficientemente pequeño como para poder prestar atención de forma individual al valor de cada parámetro.

En el caso de la escala Macro los parámetros más relevantes se centran en los modelos de elección de rutas, ya sea que se utilice el modelo Logit o el modelo Gawron, lo cual de igual forma requiere investigaciones previas para establecer valores locales o emplear resultados de estudios anteriores que se puedan emplear al tiempo y lugar que se están modelando.

5. Generación y análisis de resultados

Durante la revisión de resultados se encontró que los tramos de red vial con resultados de flujo vehicular en la simulación Micro no son exactamente los mismos tramos con flujo vehicular en las simulaciones Meso o Macro. Por causa de esto, para el análisis de resultados se tuvieron en cuenta únicamente los enlaces viales en los que hubo flujo vehicular durante la simulación Micro. A continuación, se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos entre las tres escalas de simulación.

Una vez generados los resultados para cada una de las escalas de simulación se generaron análisis comparativos que permitieran establecer patrones diferenciadores y sus posibles causas asociadas. A continuación, se comparan cada uno de los resultados de interés obtenidos.

5.1. Velocidades promedio de circulación

5.1.1. Distribución de velocidad sobre la red de transporte

Tal como puede observarse en la Figura 9, sobre el distrito de Corticella se presenta un gran rango de velocidades que llega hasta los 22.5 m/s (81 km/h). Las mayores velocidades se desarrollan en el centro del distrito, específicamente sobre la Via dell'Arcoveggio y la Via Stendha, las cuales constituyen corredores principales de circulación en el sentido norte – sur y viceversa. Pese a que en gran parte de la Via dell'Arcoveggio se presenta una reducción de la calzada debido al uso compartido con zonas de estacionamiento y puntos para la disposición de residuos sólidos, esto no evita que sobre el corredor se desarrollen velocidades superiores a los 50 km/h. Por otra parte, en la Via Stendha se cuenta con un corredor doble calzada con dos carriles por sentido, lo cual propicia el desarrollo de altas velocidades en el sector. En el sector norte sobre la Via P. Fabbri y la Via Genuzio Bentini también se desarrollan velocidades que ascienden por encima de los 80 km/h.

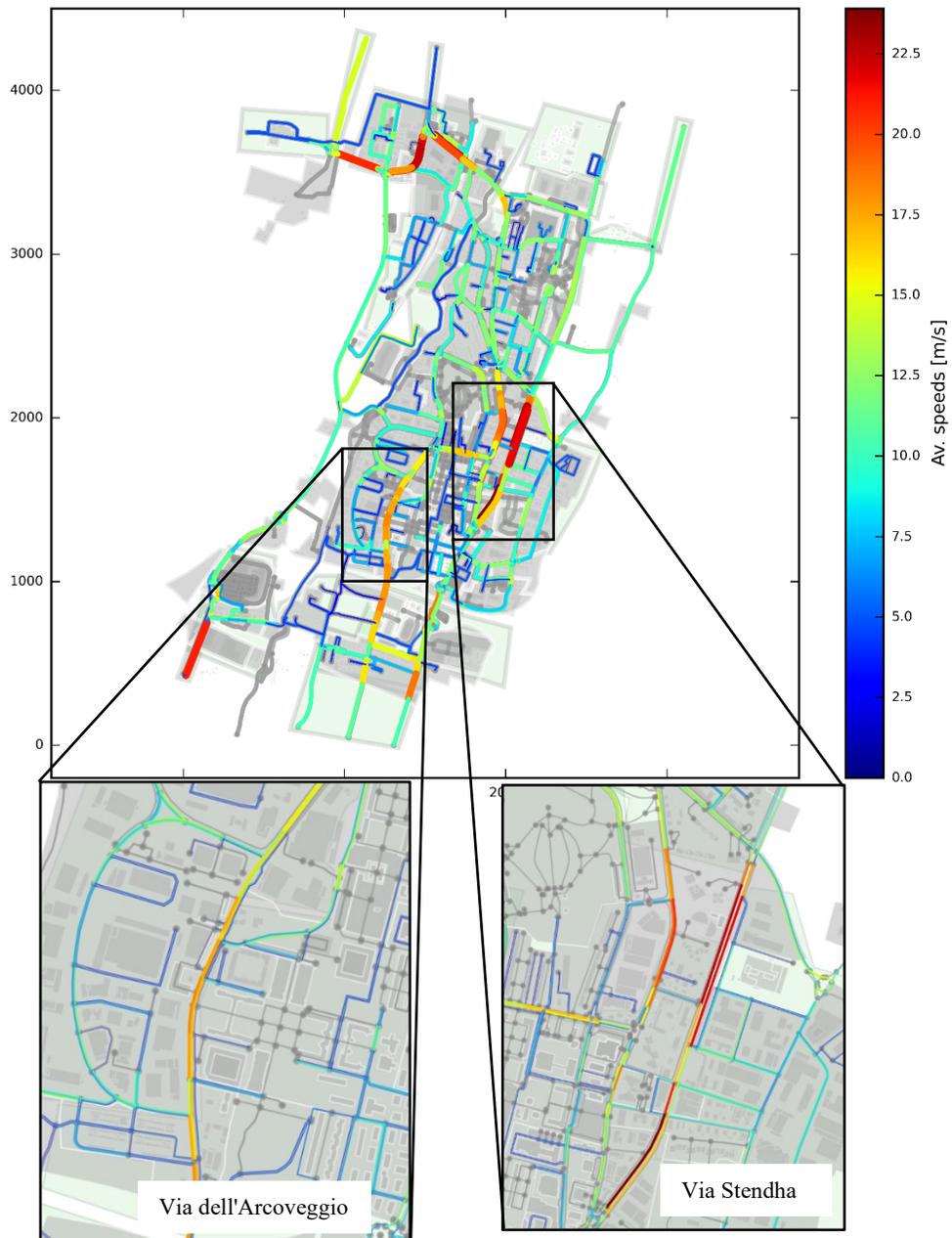
En la Figura 10 se observan las velocidades promedio de circulación para el escenario Meso, aquí se puede identificar una mayor intensidad de color sobre la mayoría de los corredores viales incluyendo la Via dell'Arcoveggio y la Via Stendha. Esto indica que las simulaciones Meso tienden a mayorar los resultados de velocidad respecto a los resultados Micro. En efecto, el 82% de los elementos de la red presenta velocidades resultantes de la simulación meso superiores respecto a las velocidades de la simulación micro,

Adicionalmente es destacable que no todos los tramos viales de la red cuentan con resultados de velocidad, en algunos tramos viales las velocidades son nulas. Por otra parte, los flujos vehiculares resultantes de la simulación meso también se distribuyeron sobre corredores

viales en los que, según los resultados micro, no había flujo vehicular. Esto se debe principalmente a la diferencia existente entre los modelos de asignación micro y meso.

Figura 9

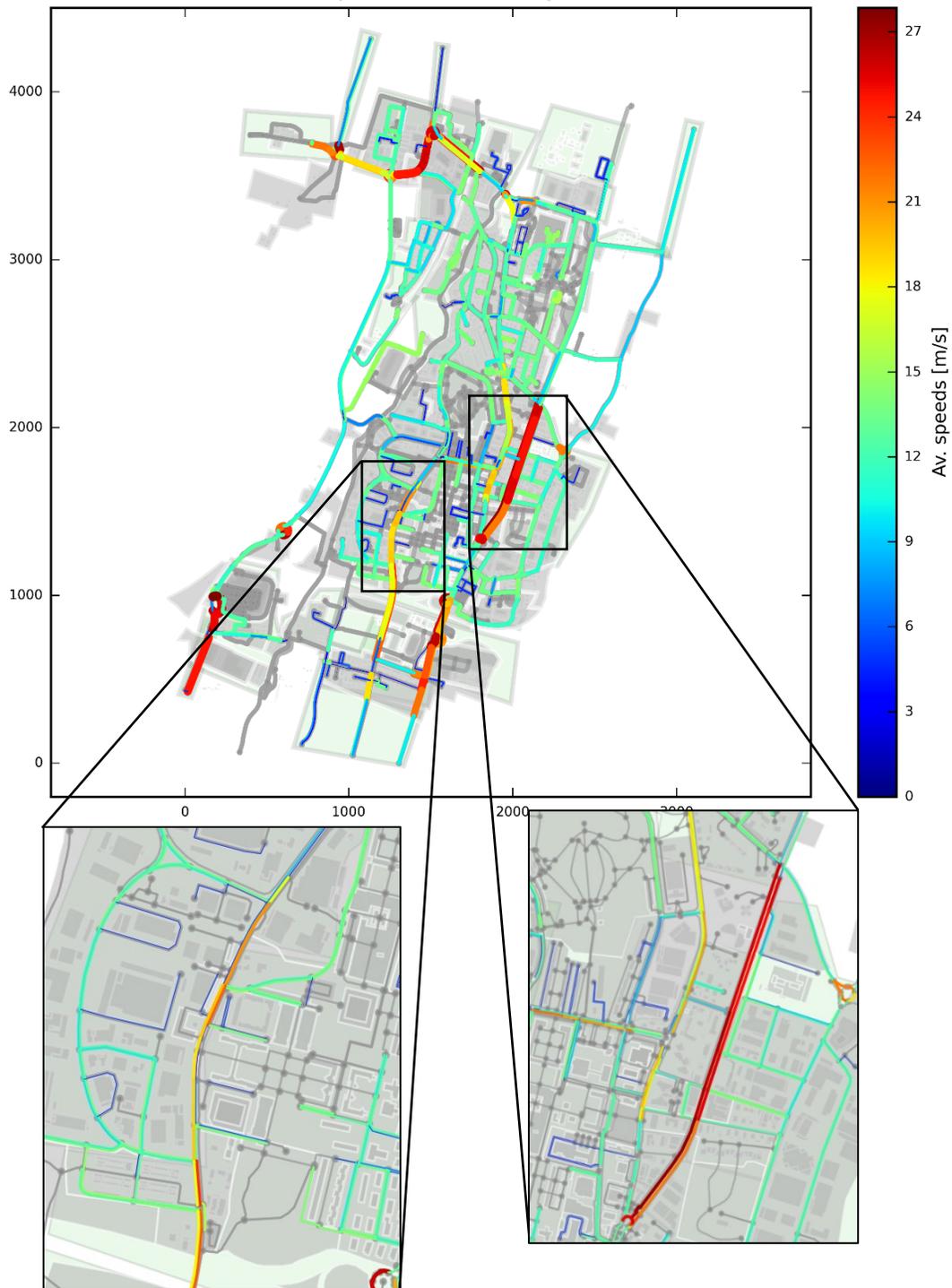
Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Micro



Nota: Elaboración propia.

Figura 10

Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Meso

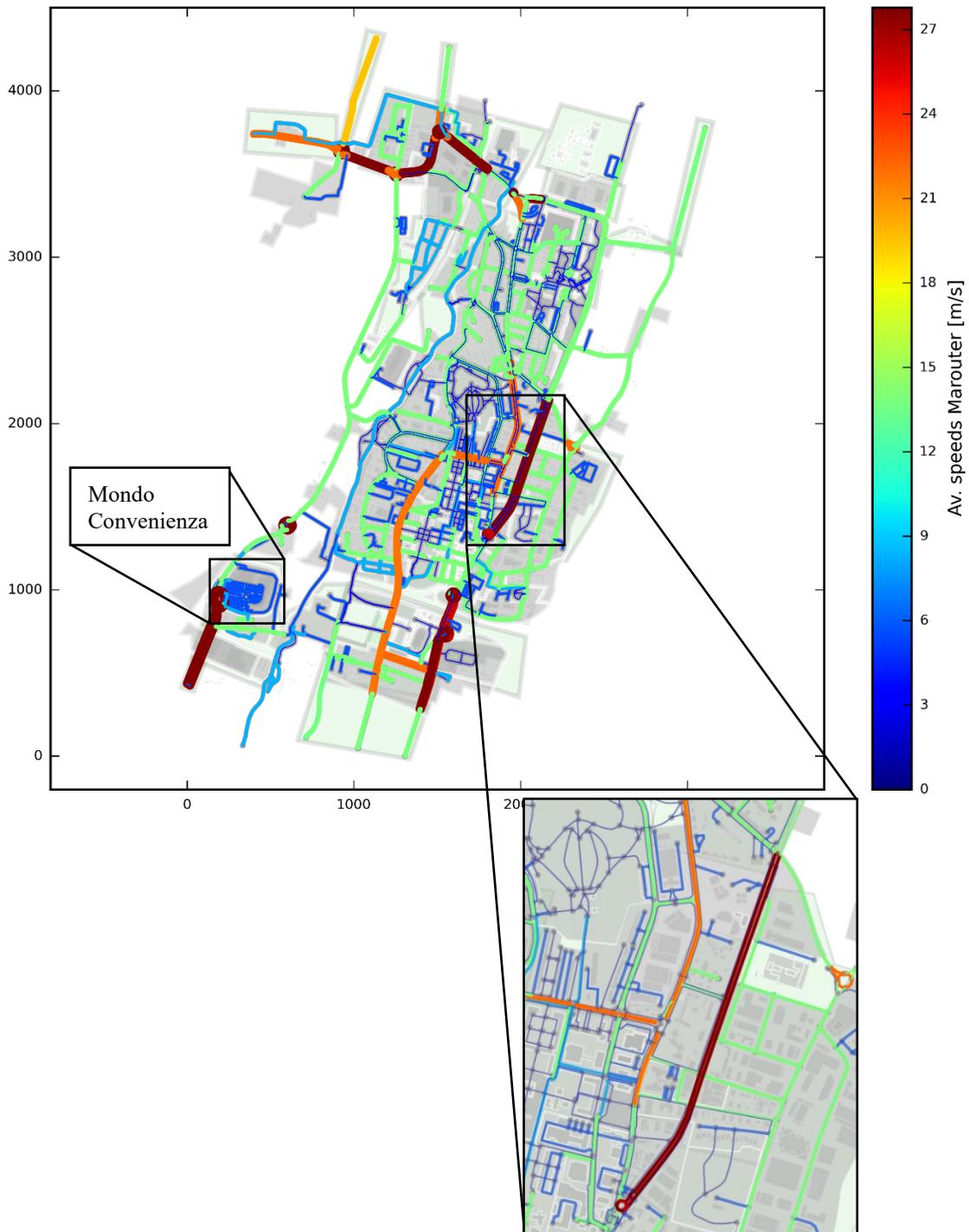


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 11 se presentan los resultados de velocidades promedio de circulación según el escenario Macro, aquí se evidencia un aumento notable de velocidades en los elementos que de por sí ya contaban con velocidades relativamente altas (la Via dell'Arcoveggio y la Via Stendha), también puede identificarse un aumento de la cantidad de elementos que presentan velocidades, los cuales no contaban con este dato en los dos escenarios anteriores, puede citarse a modo de ejemplo el sector de Mondo Convenienza, este sector está destinado específicamente al estacionamiento de vehículos en un sector comercial de Corticella (ver Figura 11).

Figura 11

Velocidad promedio de circulación sobre la red vial – escenario Macro



Nota: Elaboración propia.

5.1.2. *Histogramas comparativos*

En los resultados de velocidades de la simulación se puede observar en la Figura 12 que las velocidades más frecuentes sobre toda la red para el escenario Micro se encuentran comprendidas en el rango de 16 a 24 Km/h con 311 elementos de red, seguido por el rango de 40 a 48 Km/h con 211 elementos. Dada la asimetría del histograma hacia el sector izquierdo es evidente que la mayoría de las velocidades en la red no supera los 48 km/h y presenta pocos elementos que superen esta velocidad.

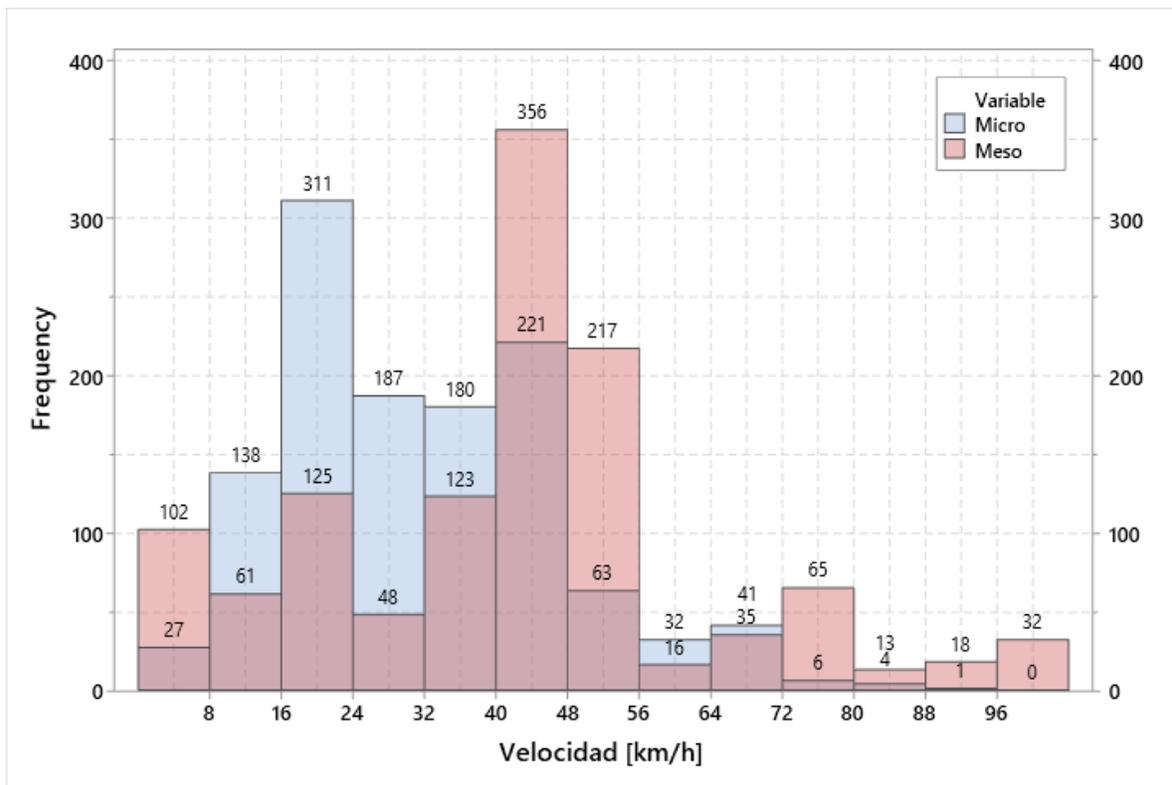
Para la simulación meso las velocidades más frecuentes se encuentran en los rangos de 40 a 48 Km/h con 356 elementos. Pese a que en la simulación Meso existe un menor grado de asimetría hacia el sector izquierdo, se evidencia que en su mayoría las velocidades no superan los 56 km/h. Esto sugiere que en general la simulación meso tiende a mayorar la media de las velocidades respecto a las velocidades Micro, esto puede ser debido principalmente a la simplificación de los modelos matemáticos Meso empleados para la asignación de vehículos a la red de transporte.

El histograma comparativo de los resultados de velocidad en las simulaciones Micro y Macro se presentan en la Figura 13. En los resultados Macro existen muchos más elementos que cuentan con datos de velocidad, lo cual es coherente debido a que la teoría de modelado Macroscópico de flujos de tráfico se fundamenta en la descripción de la evolución espacio-tiempo de las variables que caracterizan el flujo macroscópico (volumen, velocidad y densidad), las cuales están definidas en todo instante de tiempo y en todo punto del espacio (Barceló, 2010). En el histograma se observa que para el escenario Macro las velocidades más frecuentes se encuentran comprendidas entre los 48 y 56 Km/h con 693 tramos de red, seguido por el rango de 16 a 24 Km/h

con 136 tramos de red. Esto indica que, si bien hay más elementos en la red con resultados, la mayoría de los resultados se encuentran comprendidos en rangos muy específicos de velocidades que están muy separadas respecto a su media en comparación con los resultados Micro.

Figura 12

Histograma grupal de velocidades Micro vs Meso

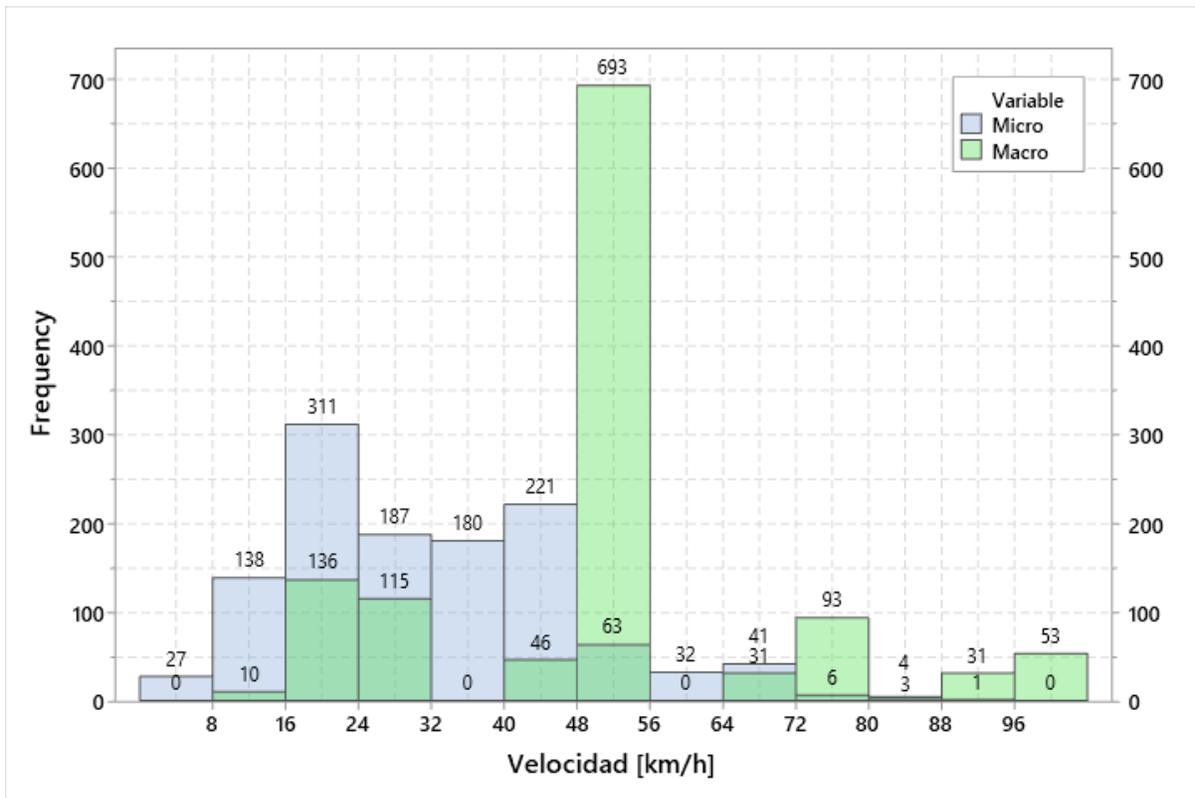


Nota: Elaboración propia.

Adicionalmente es evidente que la velocidad más frecuente en la simulación Macro difiere en gran medida respecto a la velocidad más frecuente de la simulación Micro. Partiendo de la hipótesis de que los resultados Micro se asemejan más a la realidad (Barcelo et al., 2005) se puede

concluir que los resultados Macro, al igual que los resultados Meso tienden a mayorar las velocidades reales.

Figura 13
Histograma grupal de velocidades Micro vs Macro

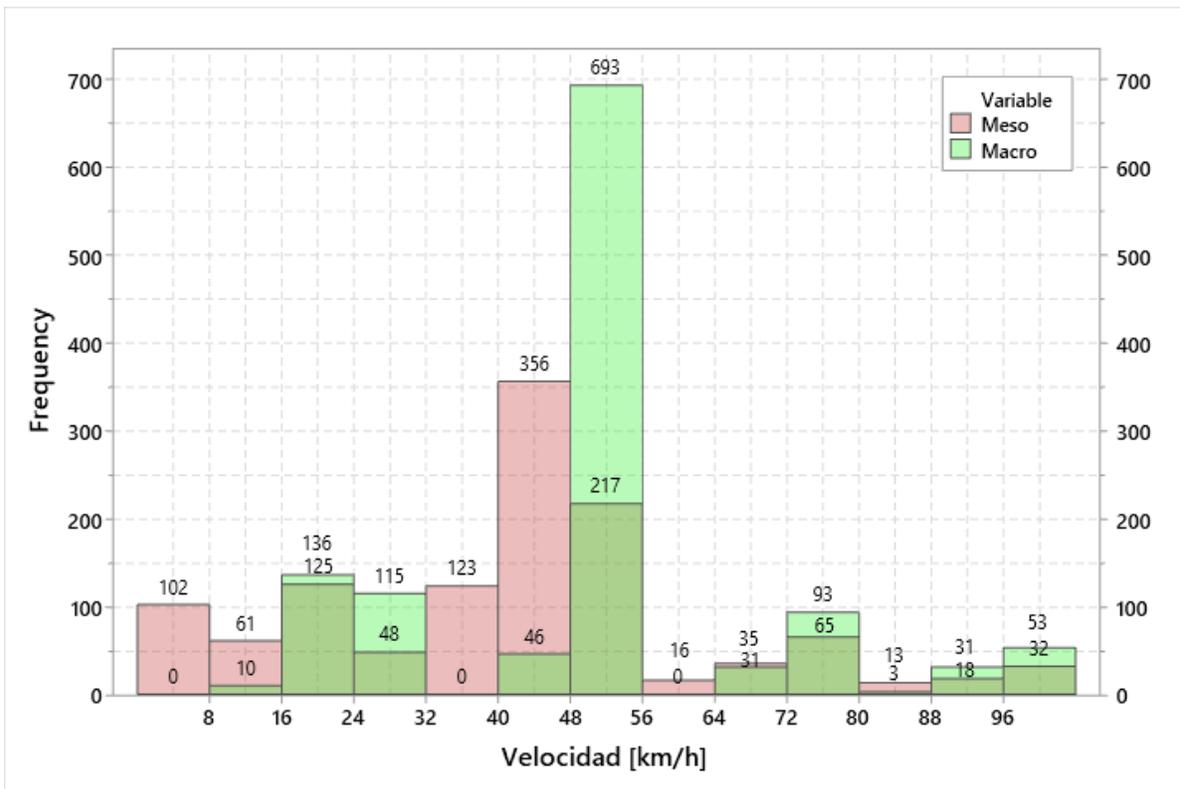


Nota: Elaboración propia.

El histograma comparativo de los resultados de velocidad en las simulaciones Meso y Macro se presentan en la Figura 14. El histograma de velocidades Macro se asemeja al de velocidades meso con la diferencia de que cuenta con agrupamiento de datos en los sectores alejados de la media (49.78 km/h), esto sería un indicador de que cuenta con una curtosis alta respecto a las demás escalas de simulación, y en efecto, los resultados de velocidad macro, poseen

una curtosis de 0.73, la cual es superior respecto al 0.36 de la velocidad meso y al 0.059 de las velocidades micro, este alto valor de curtosis también es un indicador de que los resultados macro cuentan con una gran cantidad de valores atípicos, lo cual se confirma en el análisis de los gráficos de cajas y bigotes de las siguientes secciones. Su velocidad más frecuente es muy similar a la del escenario Meso y presenta una concentración de datos en rangos pequeños de velocidad.

Figura 14
Histograma grupal de velocidades Meso vs Macro



Nota: Elaboración propia.

5.1.3. *Comparación de valores individuales*

En la Figura 15 se puede observar que los resultados de la simulación micro poseen una gran concentración de datos alrededor de su media tal como se mencionó anteriormente, esto a su vez representa que las velocidades de la red son consistentes en un rango amplio, por otra parte, en los resultados meso se observan espacios vacíos entre los grupos de datos, lo cual indica la posibilidad de que existan valores atípicos y a su vez que las velocidades en la red están clasificadas en rangos de velocidades más específicos; finalmente los resultados macro cuentan con marcadas separaciones entre los grupos de datos, lo que cual es concordante con el alto valor de curtosis mencionado en la sección anterior y la presencia de más valores atípicos respecto a la simulación meso.

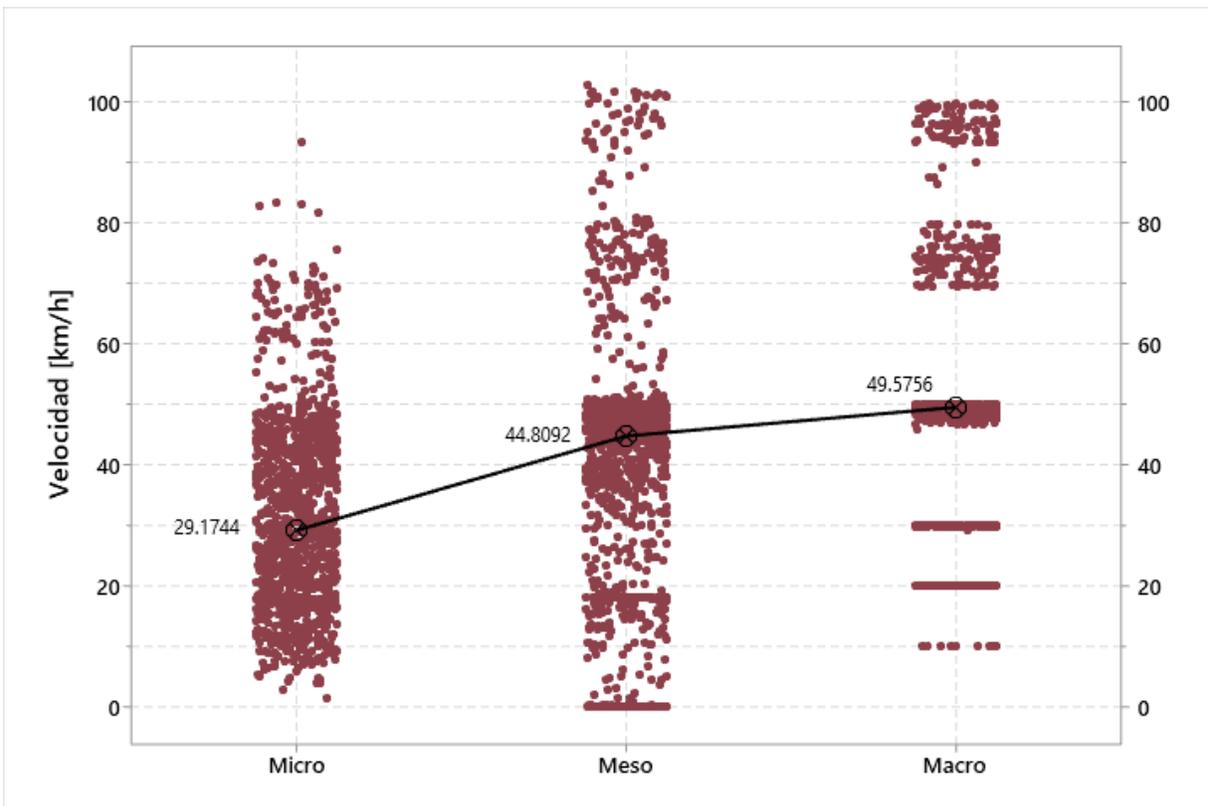
En la Figura 15 puede observarse también una variación entre las medianas de velocidad de cada escenario, la mediana de los resultados macro es de 49.6 [km/h], la más alta de los tres escenarios, en estos resultados los datos se agrupan en su mayoría por encima de la mediana; por otra parte, los resultados del escenario meso cuenta con una mediana de 44.8 [km/h] y los datos de velocidad se agrupan en su mayoría alrededor de ese valor.

Por otra parte, es importante mencionar que la desviación estándar de los datos de velocidades micro es de 15.501 [km/h], para las velocidades meso es de 22.345 [km/h] y para las velocidades macro es de 19.188 [km/h]; esto indica que los resultados de velocidades meso, hay más elementos de la red que tienen velocidades muy dispersas respecto a su media que en las demás escalas, siendo la escala micro la que posee menos elementos de red con velocidades dispersas.

Es destacable que pese a las agrupaciones generadas en la distribución de velocidades macro la desviación estándar de los datos sea baja, esto se debe a que los valores de velocidad dentro de cada grupo no difieren mucho entre sí, pero la dispersión de los grupos indica que los valores de velocidad en cada grupo están muy alejados de la media, lo cual se debe principalmente a la presencia de valores atípicos o extremos en cada grupo que están muy alejados del centro de la distribución.

Figura 15

Gráfico de valores individuales de velocidad



Nota: Elaboración propia.

5.1.4. Gráficos de cajas y bigotes comparativos

Debido al elevado valor del estadístico de curtosis de los resultados macro, resulta poco conveniente generar un gráfico de cajas y bigotes ya que en su mayoría los datos se identificarían como datos atípicos, debido a esto únicamente se construyeron gráficos para los resultados de la simulación Micro y Meso. Estos resultados indican que el 50% de los tramos de la red vial no superan los 29 km/h y la mayoría de los elementos de red poseen velocidades comprendidas entre 17.7 km/h y 42.6 km/h, mientras que para la simulación meso el mismo porcentaje de tramos viales llega a velocidades de hasta 46 km/h y la mayoría de los elementos de red poseen velocidades entre los 37.3 km/h y 49.7 km/h; para la simulación Macro el 50% de los tramos viales alcanza velocidades de hasta 20 km/h y la mayoría de los elementos cuenta con velocidades comprendidas entre los 10 km/h y los 50 km/h. Estos resultados se pueden observar en la Figura 16.

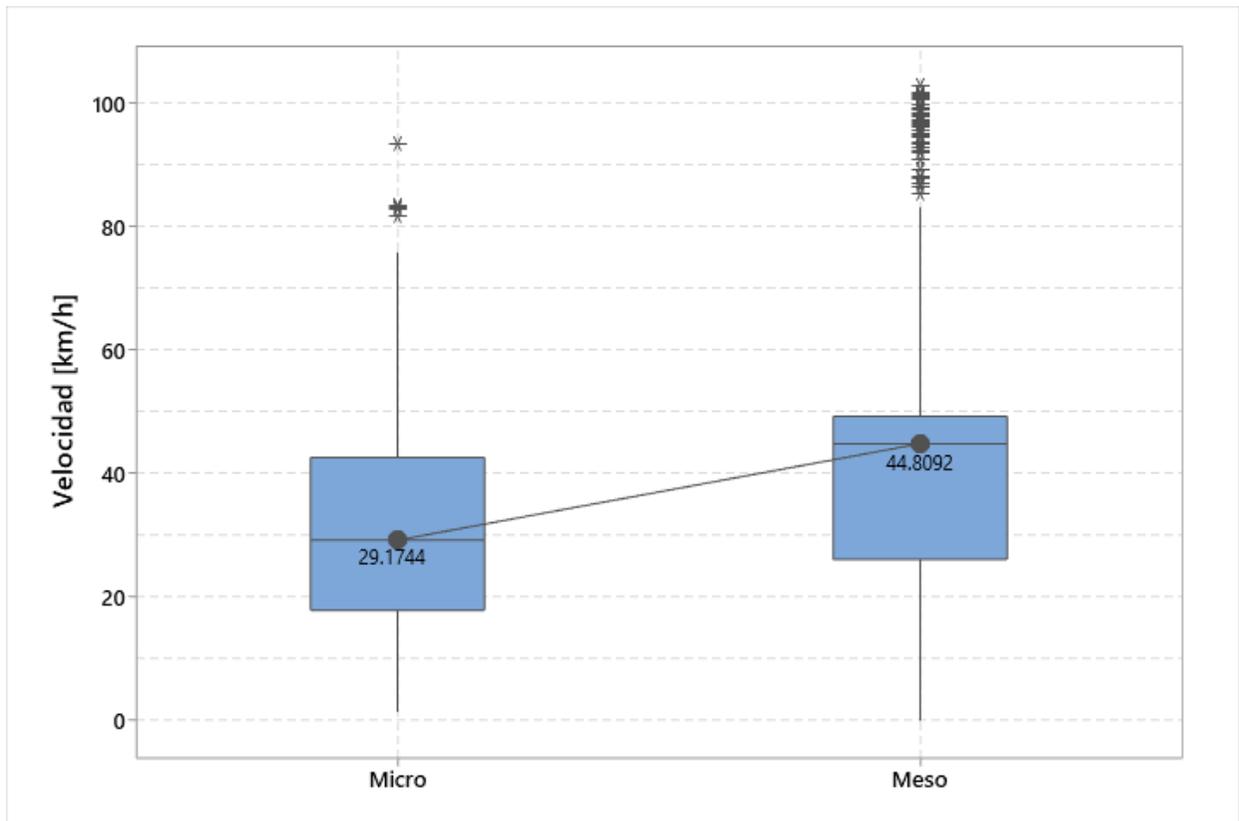
Es destacable además que para la simulación Micro, algunos elementos de red tienen velocidades que bajan hasta un mínimo de 1.5 km/h, lo cual se puede justificar con la presencia de semáforos y cruces en los que es necesario detenerse momentáneamente, también se identifican altas velocidades de hasta 75.8 km/h, resultados atípicos que superan los 80 km/h y solo uno que supera los 90 km/h. Si bien los datos atípicos aparentan representar resultados erróneos, no lo son, debido a que se presentan en corredores viales con velocidades que permiten alcanzar estos valores, específicamente el valor atípico más alto se presenta sobre la Via Stendha, la cual cuenta con altas especificaciones tal como se mencionó anteriormente.

Para la simulación Meso se presentan un número considerable de velocidades atípicas por encima de la mediana llegando incluso a superar los 100 km/h. Los valores atípicos corresponden con los tramos de red más cargados en la red de transporte (ver Figura 17) entre los cuales se

destaca la Via Stendha, la cual cuenta con especificaciones adecuadas para garantizar estas velocidades.

Figura 16

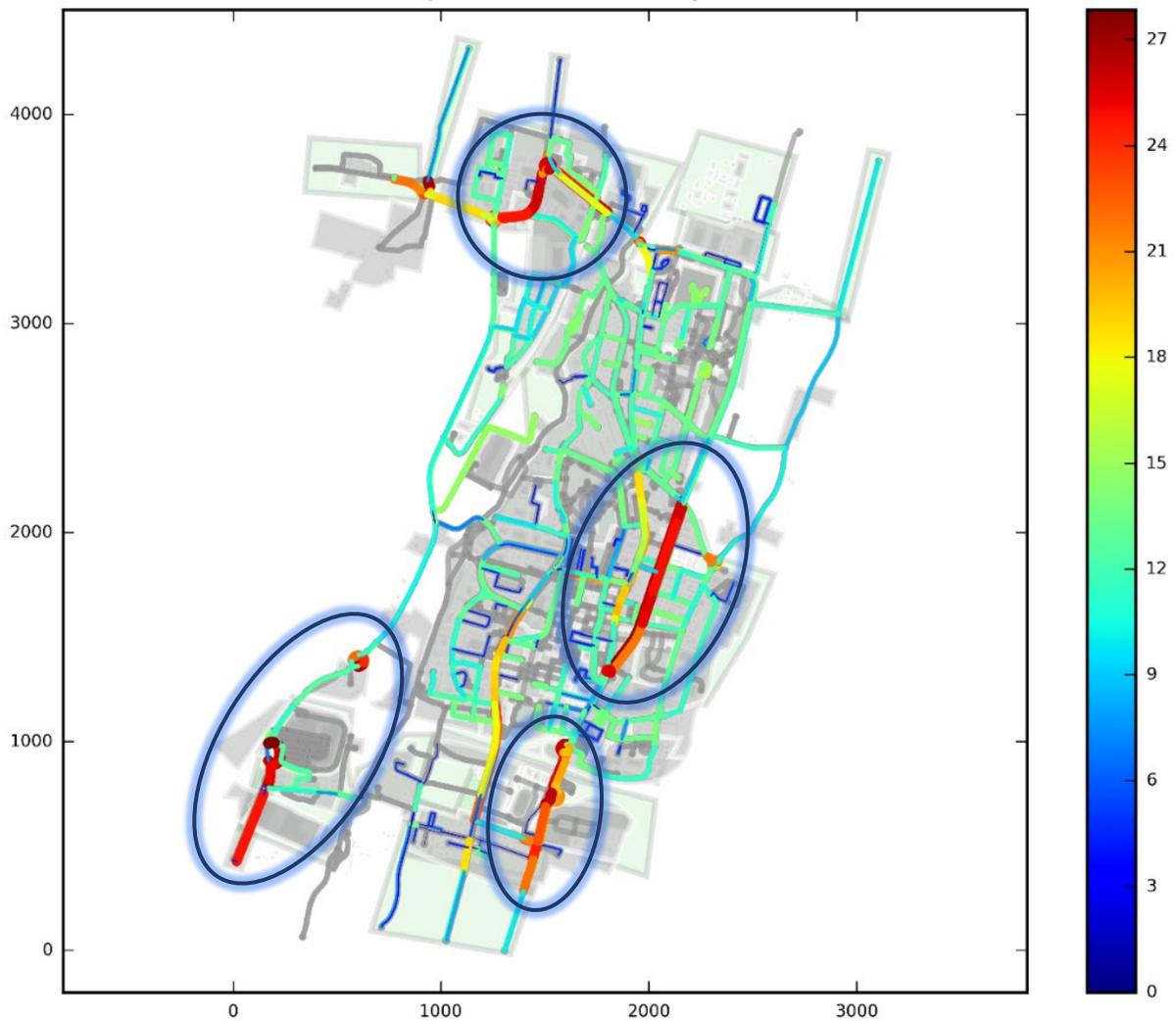
Grafica de caja grupal para velocidades Micro, Meso y Macro



Nota: Elaboración propia.

Figura 17

Valores atípicos de velocidad en los resultados Meso



Nota: Elaboración propia.

5.2. Densidades de flujo

Para las escalas Meso y Micro se generaron resultados de densidad directamente, sin embargo, en el caso de la escala Macro, la simulación únicamente genera resultados de velocidad,

cantidad de vehículos que entran a cada enlace y datos de saturación de estos. Debido a esto las densidades de flujo Macro se analizarán de forma independiente durante el desarrollo de la sección.

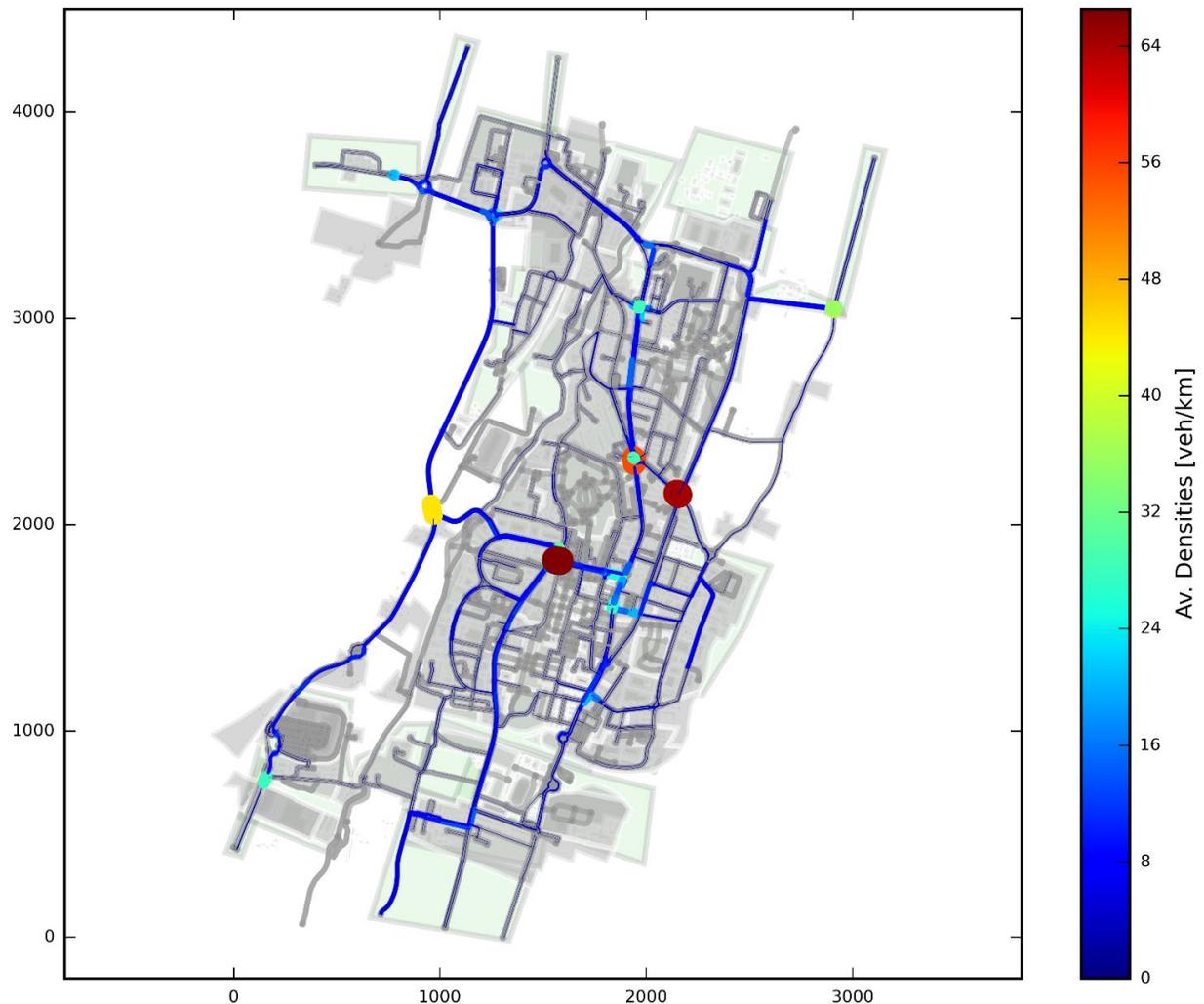
5.2.1. Distribución de densidad sobre la red de transporte

Las densidades resultantes del escenario Micro son principalmente bajas, exceptuando sectores específicos en los cuales existen intersecciones de vías principales semaforizadas, lo cual justifica el leve incremento de las densidades. Adicionalmente en la Rotonda Don Giuseppe Nozzi (en el norte del distrito) también se evidencian altas densidades debido a que en este punto convergen cuatro accesos muy cercanos a importantes corredores nacionales. En cuanto a la distribución, las vías principales son las preferidas en la asignación debido a sus altas especificaciones, esto se puede observar en la Figura 18. Se puede observar que las densidades se concentran en tramos pequeños de carretera, lo cual es coherente ya que en esta escala de simulación los vehículos se analizan de forma independiente.

En los resultados del escenario Meso (ver Figura 18) se evidencian densidades intermedias en los corredores que convergen en las intersecciones semaforizadas de vías principales como la intersección entre la Via dell'Arcoveggio y la Via Roncaglio (Zona A); la rotonda donde se intersectan la Via Corticella y la Via del Rosario (Zona B); la intersección de la Via dell'Arcoveggio, Via Martiri di Monte Sole y la Via Ettore Zaniboni (Zona C). Se puede observar que las densidades se concentran en tramos de carretera más largos que en la escala Micro, lo cual se debe a que en la escala Meso los vehículos se modelan en paquetes y no de forma individual.

Figura 18

Densidad promedio sobre la red vial – escenario Micro



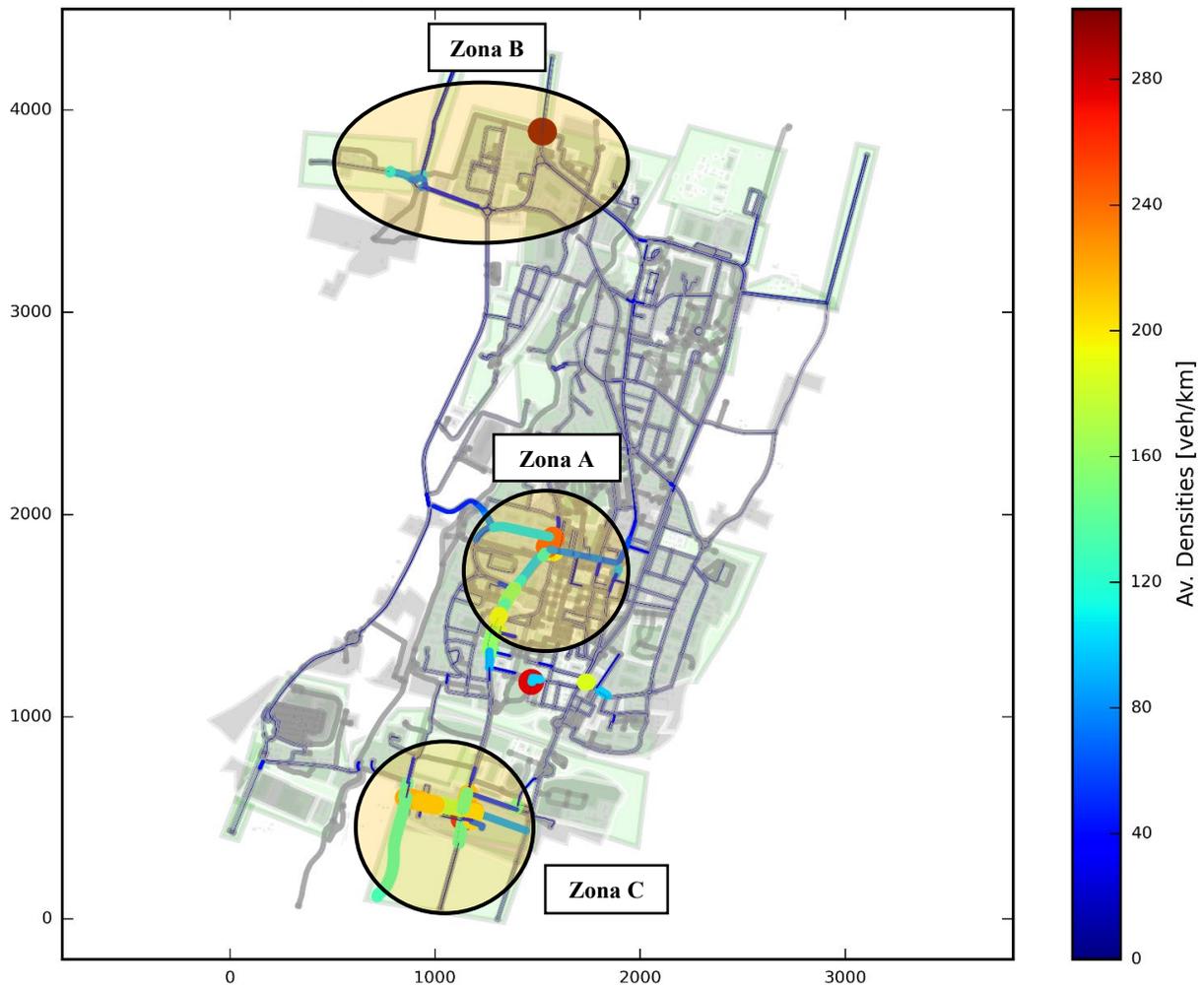
Nota: Elaboración propia.

En los resultados Macro no se generan densidades, sin embargo, la saturación es un indicativo aproximado de la distribución de densidades sobre la red, esta distribución se presenta en la Figura 20, aquí se evidencian importantes saturaciones alrededor de intersecciones de corredores principales, en este caso, sobre tramos viales más largos respecto a las dos escalas

anteriores, lo cual se debe a que en la simulación Macro el modelado de vehículos se hace en un nivel aún más agregado que en la escala Meso. Se destaca además que se presenta un porcentaje importante de saturación sobre la intersección entre la Via dell'Arcoveggio y la Via Roncaglio.

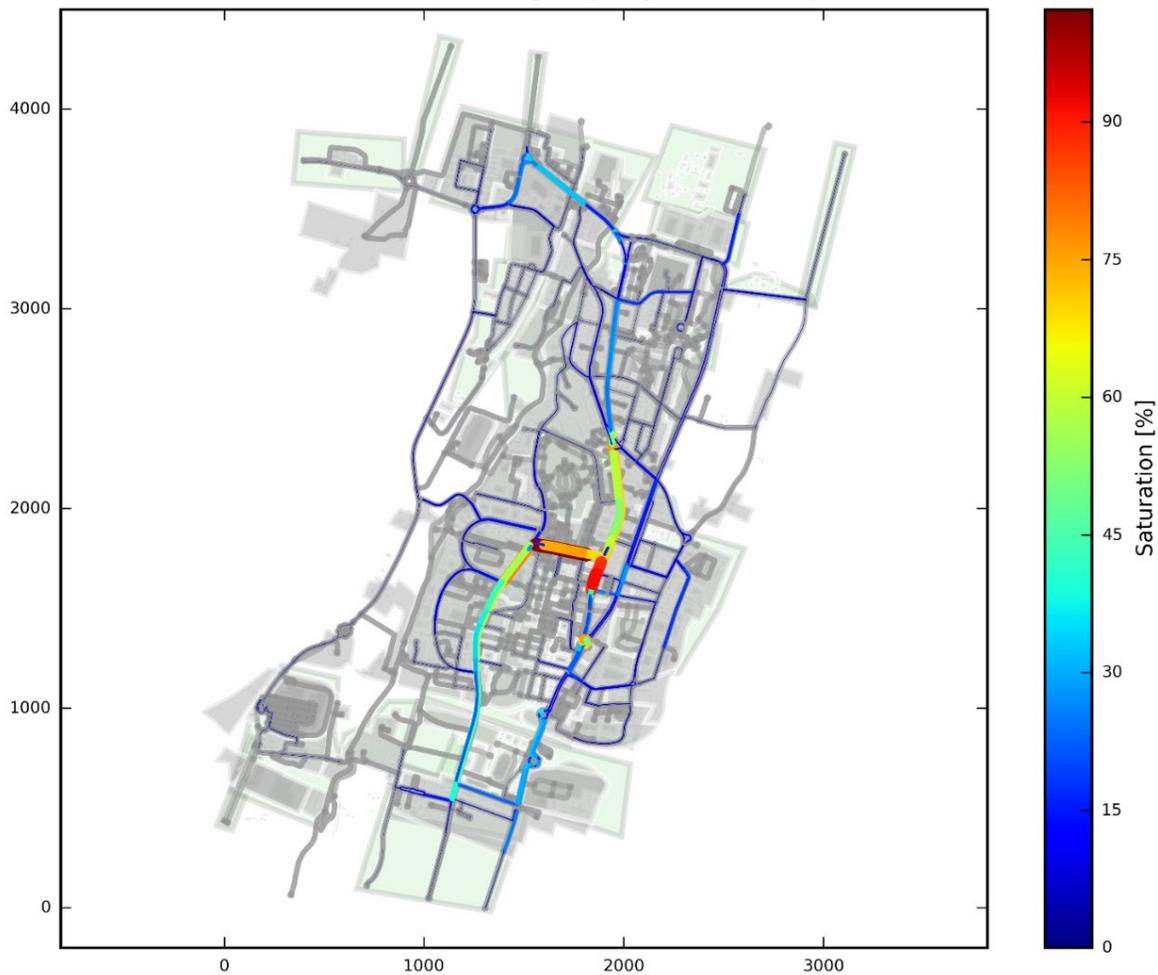
Figura 19

Densidad promedio sobre la red vial – escenario Meso



Nota: Elaboración propia.

Figura 20
Saturación sobre la red vial – escenario Macro



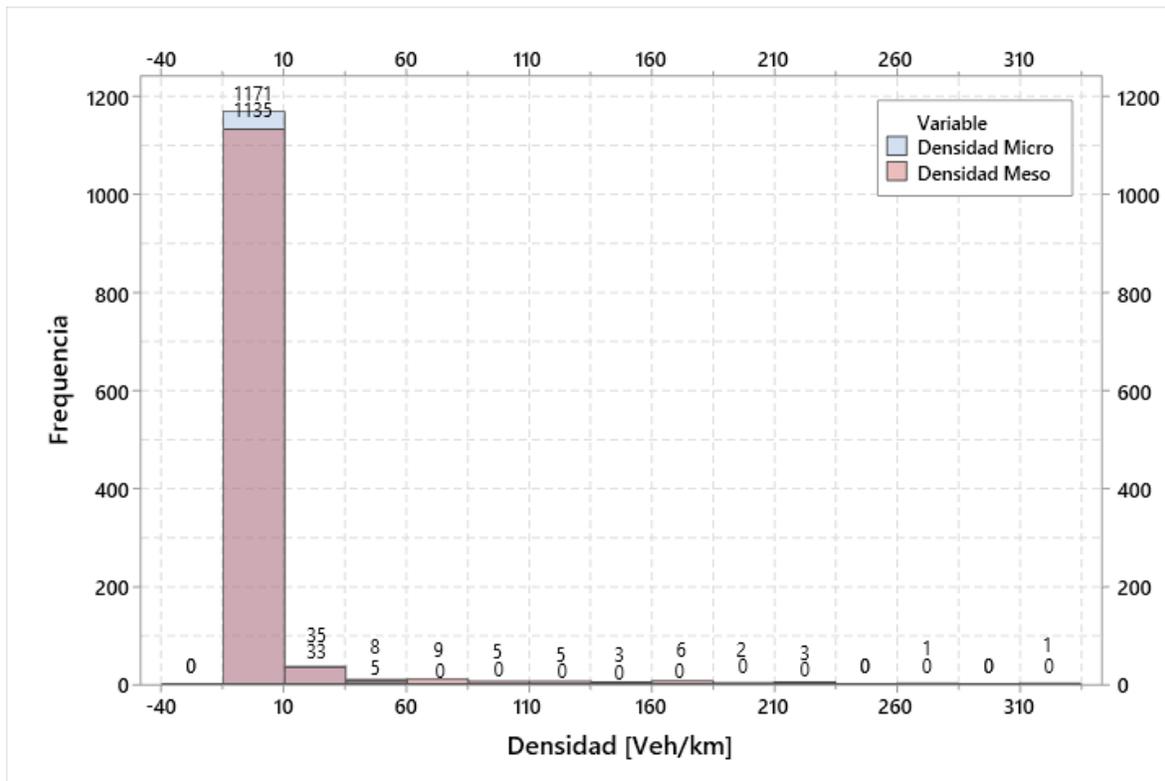
Nota: Elaboración propia.

5.2.2. Histogramas comparativos

Debido a la gran concentración de las densidades en un rango muy pequeño, los histogramas no aportan información significativamente relevante. Esto se puede evidenciar en la Figura 21, en la cual las densidades se presentan principalmente agrupadas en el rango de los 0.0 veh/km a los 10 veh/km para las dos escalas de simulación. A pesar de que se están analizando

densidades promedio de toda la red, se puede suponer que existen bajos niveles de congestión en la red, lo cual es coherente con los resultados presentados en la sección Distribución de densidad sobre la red de transporte.

Figura 21
Histograma grupal de densidades Micro vs Meso



Nota: Elaboración propia.

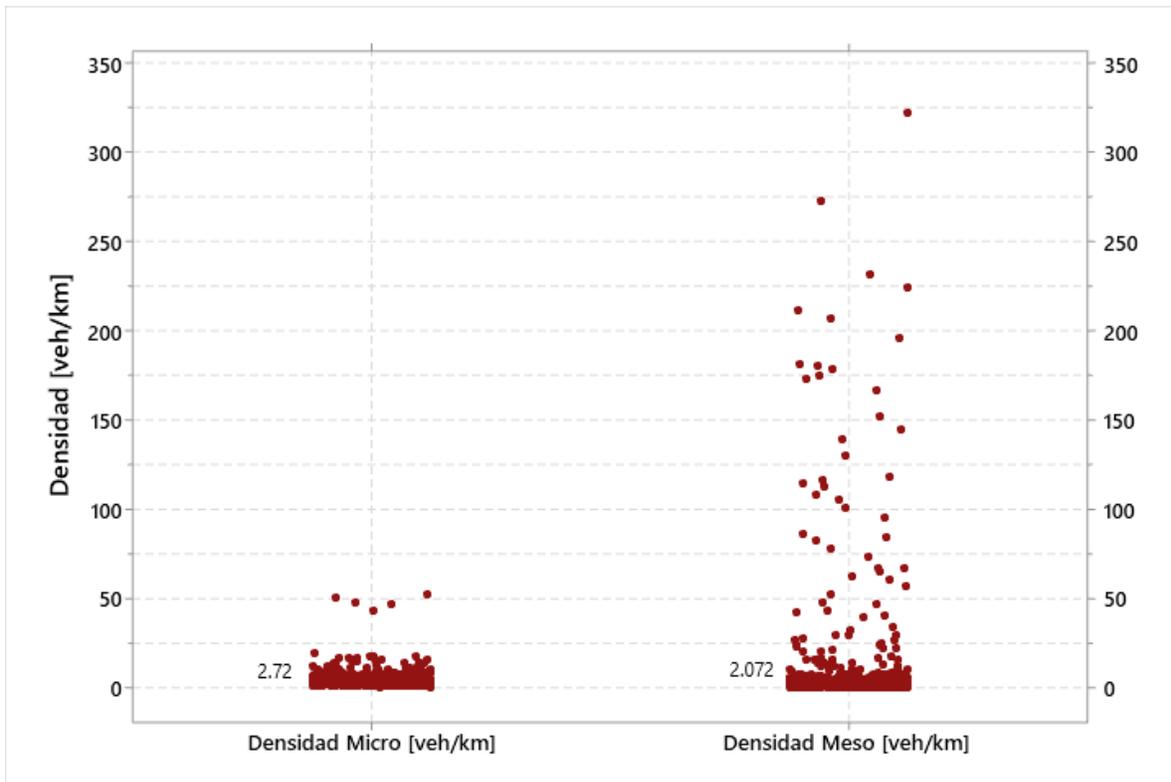
5.2.3. Comparación de valores individuales

En la Figura 22 se presentan los resultados individuales de las densidades Micro poseen una gran consistencia en las densidades ya que se agrupan alrededor de la mediana con muy pocos valores alejados de la misma, por otra parte, en los resultados meso se evidencia un mayor rango

de densidades, con un poco más de separación entre sus datos, lo cual es coherente con la distribución sobre la red de transporte y el modelado vehicular de forma agregada.

Figura 22

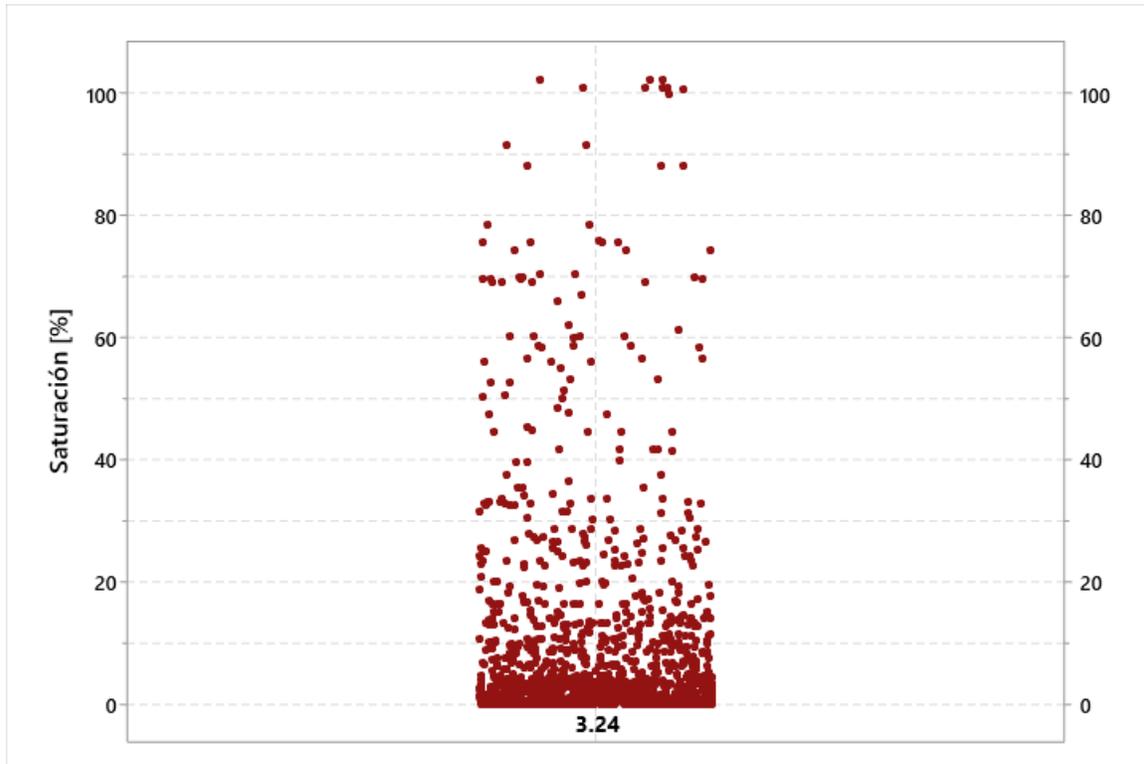
Valores individuales de densidad escalas Micro y Meso



Nota: Elaboración propia.

Respecto a las desviaciones para la escala micro se determinó en 3.723 veh/km, y para la escala meso 25.774 veh/km. En la mesosimulación de tráfico, se utiliza un modelado simplificado del comportamiento de los vehículos y los conductores en comparación con la microsimulación. En la mesosimulación, los vehículos se agrupan en categorías de flujo en función de su velocidad y densidad, mientras que, en la microsimulación, se modela cada vehículo individualmente.

Debido a esto, la mesosimulación no puede capturar detalles finos del comportamiento de los vehículos, lo que puede resultar en una mayor desviación de densidades. Tal como se mencionó anteriormente, pueden inferirse los patrones de las densidades a partir de las saturaciones en la escala Macro, en la Figura 23 se puede identificar que los valores de saturación cuentan con cierto grado de separación en un considerable rango de acción, además de esto, se puede decir que si bien una gran cantidad de datos se encuentran concentrados alrededor de la mediana, una proporción muy grande también se encuentra distribuida en todo el rango de acción, incluso aún más que en los resultados meso, lo cual es coherente con los resultados anteriormente analizados de distribución de densidades sobre la red de transporte y con la teoría de que en la escala macro los vehículos se modelan desde una perspectiva más agregada que en cualquier otra escala.

Figura 23*Valores individuales de saturación en la escala Macro*

Nota: Elaboración propia.

5.2.4. Gráficos de cajas y bigotes comparativos

De forma similar que, en la generación de histogramas, los gráficos de cajas y bigotes no aportan información significativa debido a la gran concentración de las densidades en un rango muy pequeño de datos, por lo cual la mayoría de sus datos serían representados como valores atípicos, lo cual resulta inconsistente con los resultados mencionados hasta ahora. Por esta razón se ha decidido prescindir de analizar este tipo de gráficos.

5.3. Flujos vehiculares

5.3.1. Distribución de flujos sobre la red de transporte

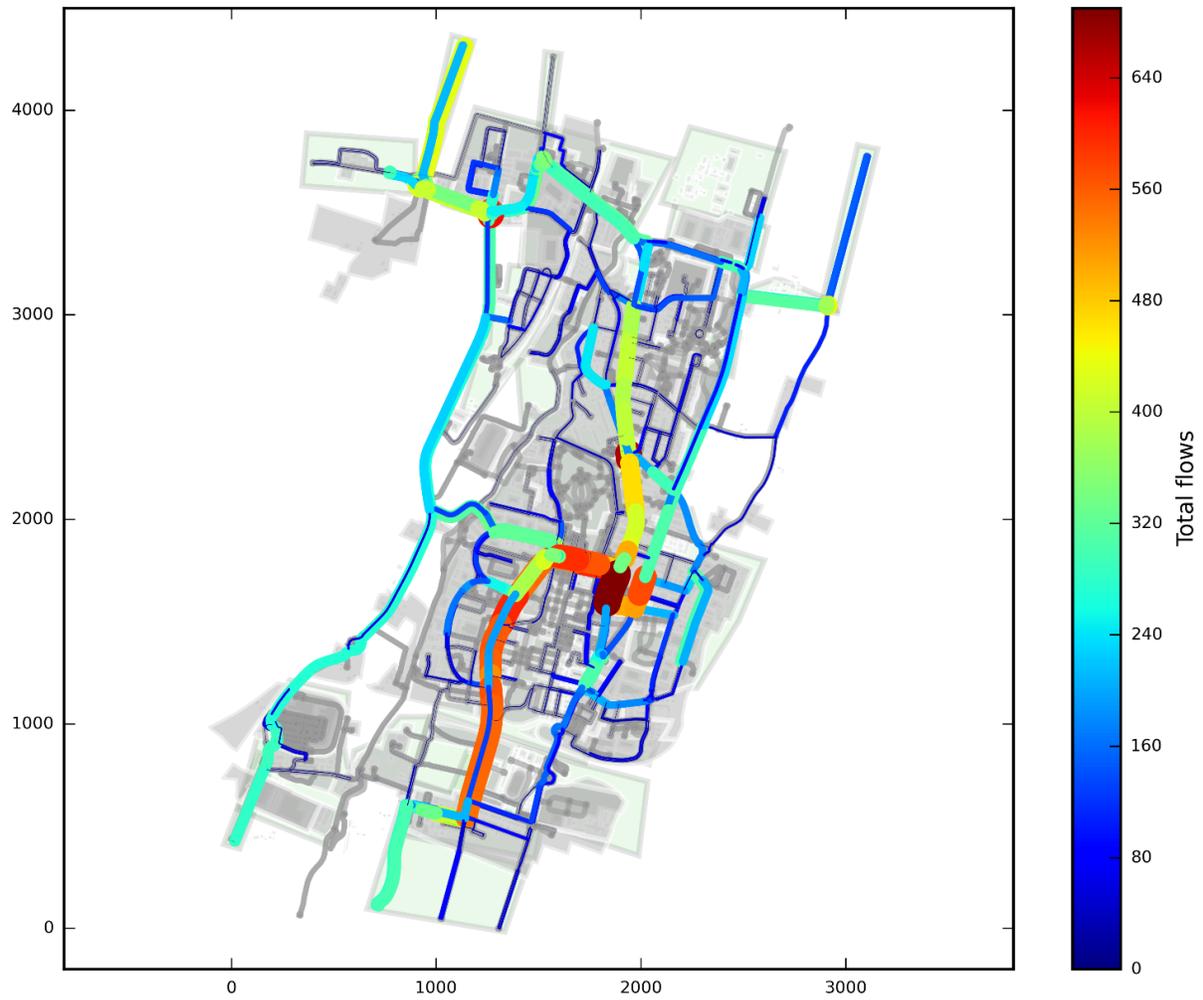
Los flujos vehiculares representan el promedio de vehículos que circulan por hora sobre la red de transporte. En la Figura 24 se puede observar que la mayor concentración de flujo se encuentra en la zona central del distrito, específicamente sobre la Via dell'Arcoveggio, la Via Roncaglio y la Via di Corticella. Es importante resaltar que sobre estos tramos viales se encuentran intersecciones semaforizadas.

En el escenario Meso la distribución de flujos cambia, en la Figura 25 se puede observar que los flujos también se concentran en el centro del distrito, se destaca que la cantidad de flujo en la escala Meso es inferior al desarrollado en la escala Micro en la mayoría de los tramos viales, adicionalmente la escala de flujos máximos desarrollados también cambia no solo en las vialidades centrales, sino también en las vialidades perimetrales de la red.

En el caso de los resultados Macro, no se cuenta con datos de flujo vehicular, por lo cual se generó un mapa partiendo de la cantidad de vehículos que entran en cada tramo vial. El mapa obtenido se presenta en la Figura 26, aquí nuevamente se presenta una gran concentración de flujo vehicular en la zona central del distrito al igual que en los resultados anteriores, con la diferencia de que los flujos máximos son superiores respecto a los resultados de las anteriores dos escalas, por lo demás la distribución de resultados parece muy similar.

Figura 24

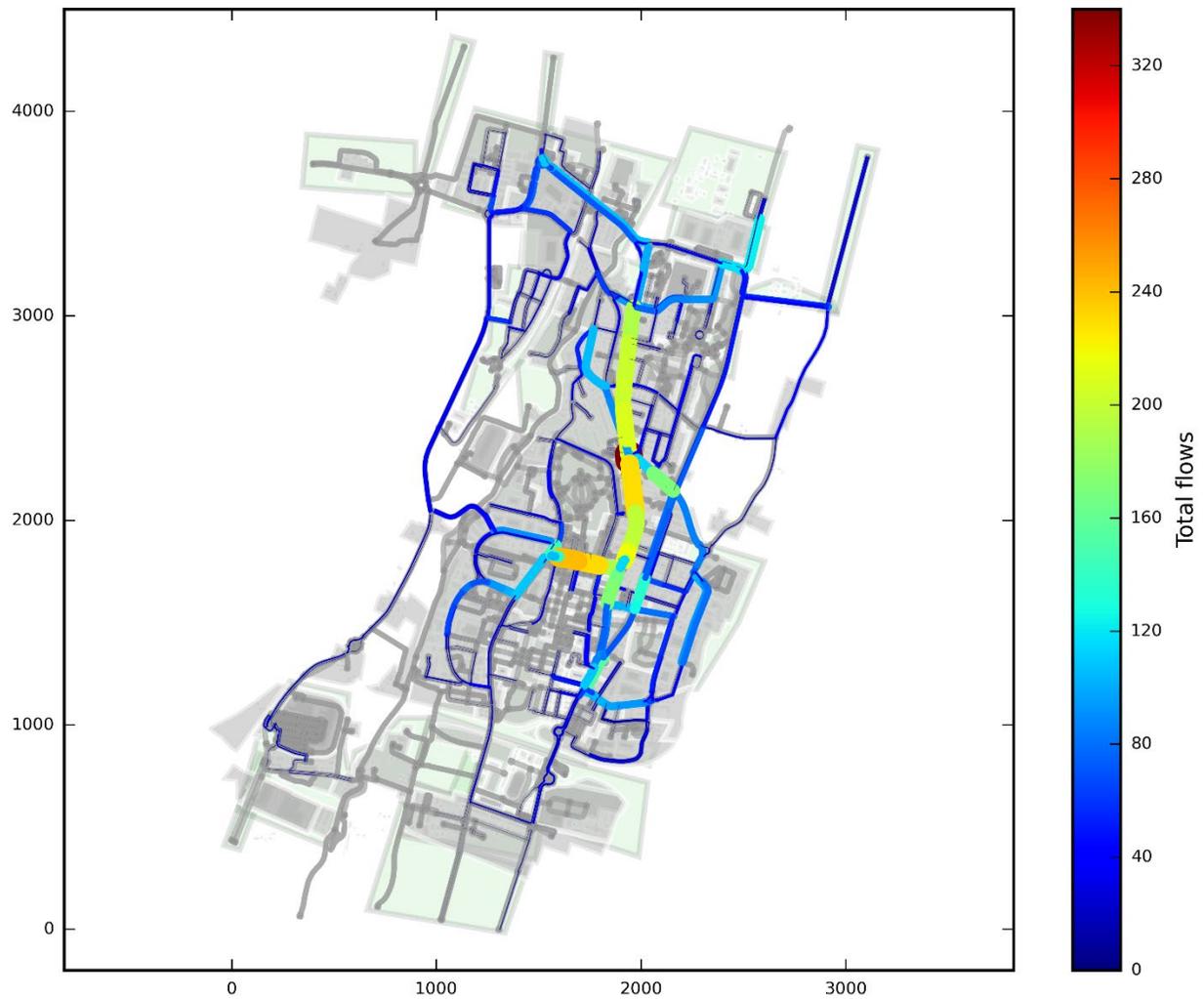
Flujos promedio sobre la red vial – escenario Micro



Nota: Elaboración propia.

Figura 25

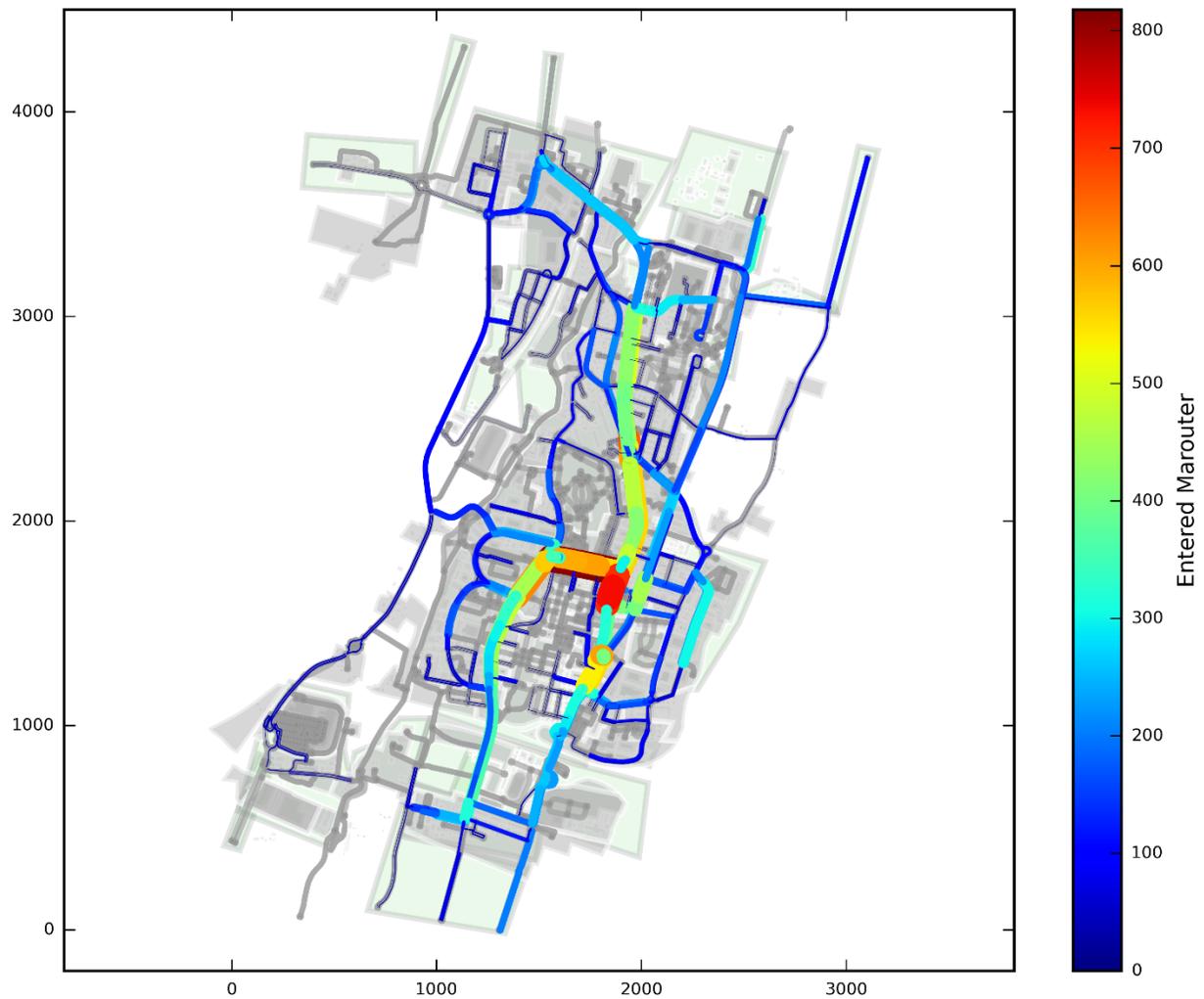
Flujos promedio sobre la red vial – escenario Meso



Nota: Elaboración propia.

Figura 26

Flujos promedio sobre la red vial – escenario Macro



Nota: Elaboración propia.

5.3.2. Histogramas comparativos

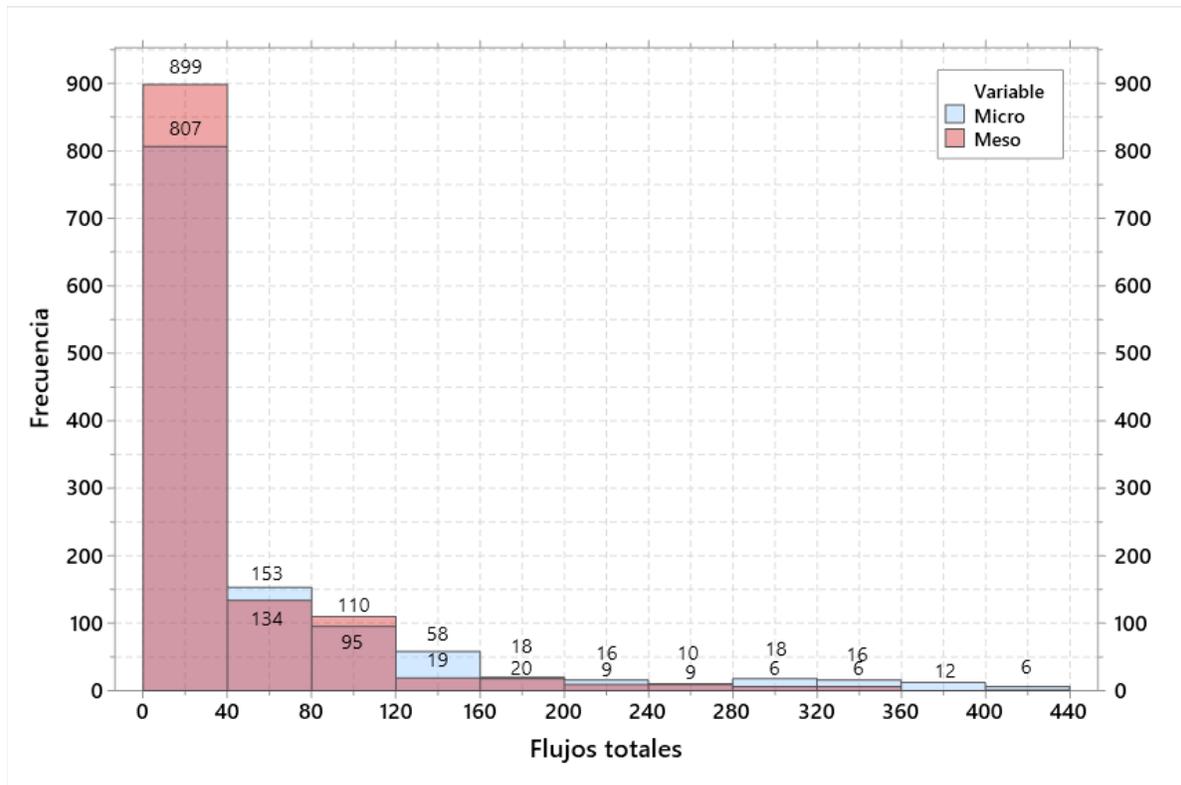
Los flujos vehiculares totales resultantes de la red de transporte principalmente se agrupan en el rango comprendido entre los 0 y los 40 vehículos por hora para la escala Micro y Meso tal como se presenta en la Figura 27. También resulta evidente que los datos resultantes de la escala

Meso cuentan con una mayor cantidad de tramos viales con flujos entre los 0 y 40 vehículos con 899 tramos viales respecto a la escala Micro, pero para los demás rangos de flujo en el histograma, la escala Micro cuenta con un mayor número de tramos viales que la escala Meso. Sin embargo, los resultados entre las dos escalas no difieren de forma significativa, son muy similares entre sí.

Teniendo en cuenta que el periodo de simulación corresponde a la hora de máxima demanda, podría decirse que los datos resultantes se refieren a flujos totales por hora para cada uno de los tramos viales de la red de transporte. En este sentido, se puede decir que ningún elemento de la red supera en ningún momento la capacidad de un tramo vial de autopista en condiciones ideales, la cual varía entre 2400 pc/h/ln y 2350 pc/h/ln para velocidades a flujo libre comprendidas entre las 70 mi/h y las 55 mi/h según el HCM (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board., 2010). El factor volumen – capacidad calculado con la capacidad teórica de una autopista y los flujos menos frecuentes y más altos de la red de transporte, indica que dichos tramos viales operan a un 18% de la capacidad teórica, esto para las escalas de simulación Micro y Meso, las cuales son muy similares en cuanto a resultados de flujo vehicular sobre la red.

En la Figura 28 se presenta el histograma de flujos totales para las escalas Micro y Macro, aquí se evidencia que los flujos para la escala Macro son superiores de forma significativa respecto a los flujos de la escala Meso, llegando incluso a contar con algunos elementos que tienen flujos de al menos 800 vehículos. Pese a esto, los resultados de la escala Macro siguen estado alejados de la capacidad ideal de una autopista anteriormente mencionada.

Figura 27
Histograma grupal de flujo Micro vs Meso



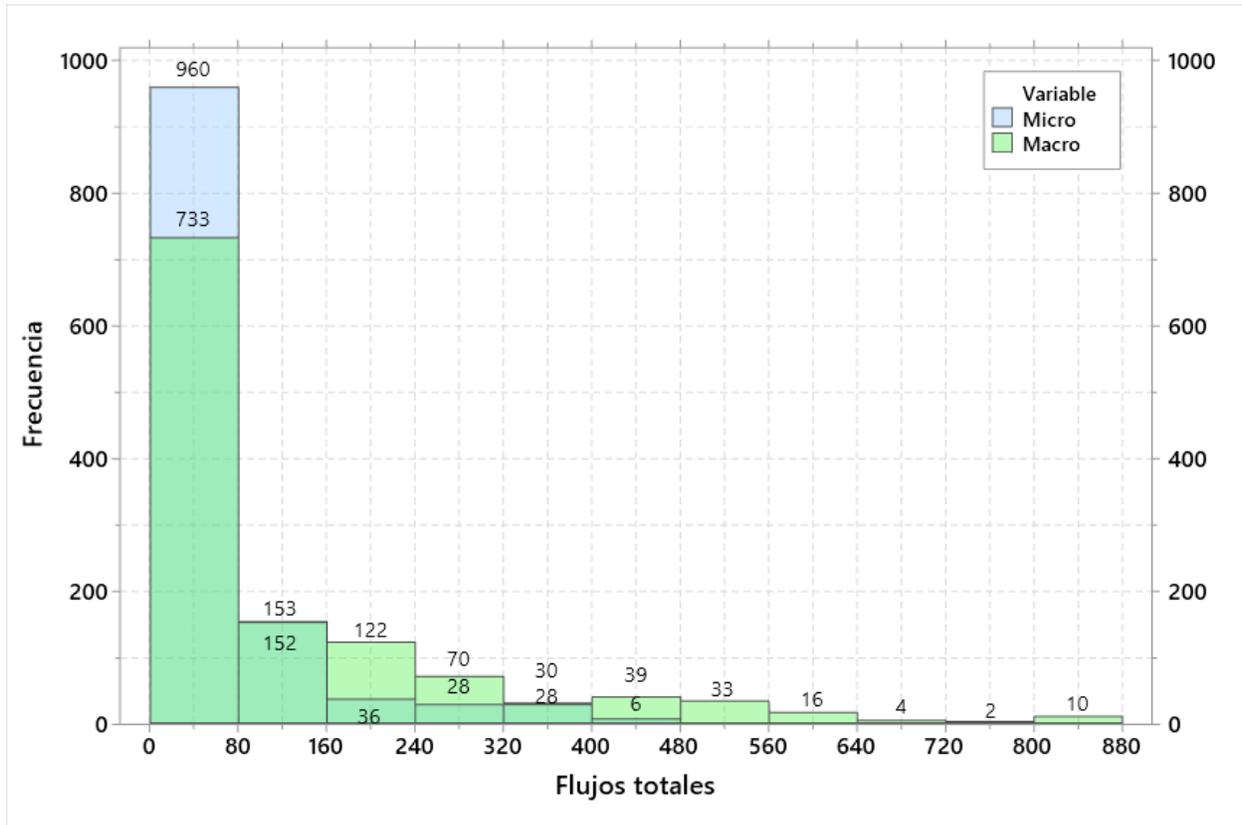
Nota: Elaboración propia.

Los resultados también indican que en el escenario Macro, los flujos están mejor distribuidos sobre toda la red ya que no se encuentran agrupados de forma tan consistente en un solo rango de datos como en la escala Micro, superando incluso la cantidad de tramos viales con rangos de flujo superiores a los 160 vehículos.

En la Figura 29 se presentan resultados similares a los descritos anteriormente, los datos de flujos totales de los tramos viales en la simulación Macro están mucho más distribuidos respecto a los resultados Meso y siguen conservando superioridad en la cantidad de tramos viales que poseen flujos superiores a los 80 vehículos.

Figura 28

Histograma grupal de flujo Micro vs Macro

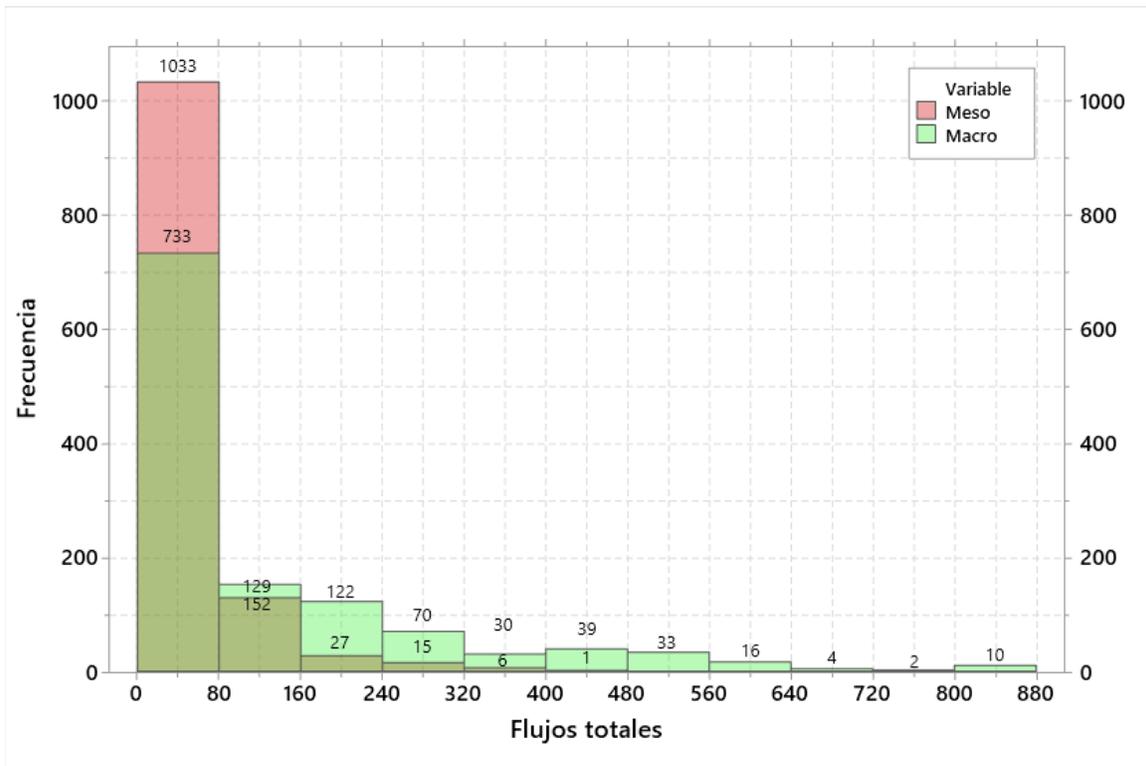


Nota: Elaboración propia.

En términos generales, los flujos y sus respectivas distribuciones son muy similares en las escalas micro y meso, pero en el caso de la escala Macro, pese a que mantiene una distribución similar, cuenta con flujos muy superiores, seguido por los flujos de la escala Meso y finalmente los flujos resultantes de la escala Micro. Esto sería una confirmación evidente de que la escala macro y meso tienden a mayorar los resultados respecto a la escala micro.

Figura 29

Histograma grupal de flujo Meso vs Macro



Nota: Elaboración propia.

5.3.3. Comparación de valores individuales

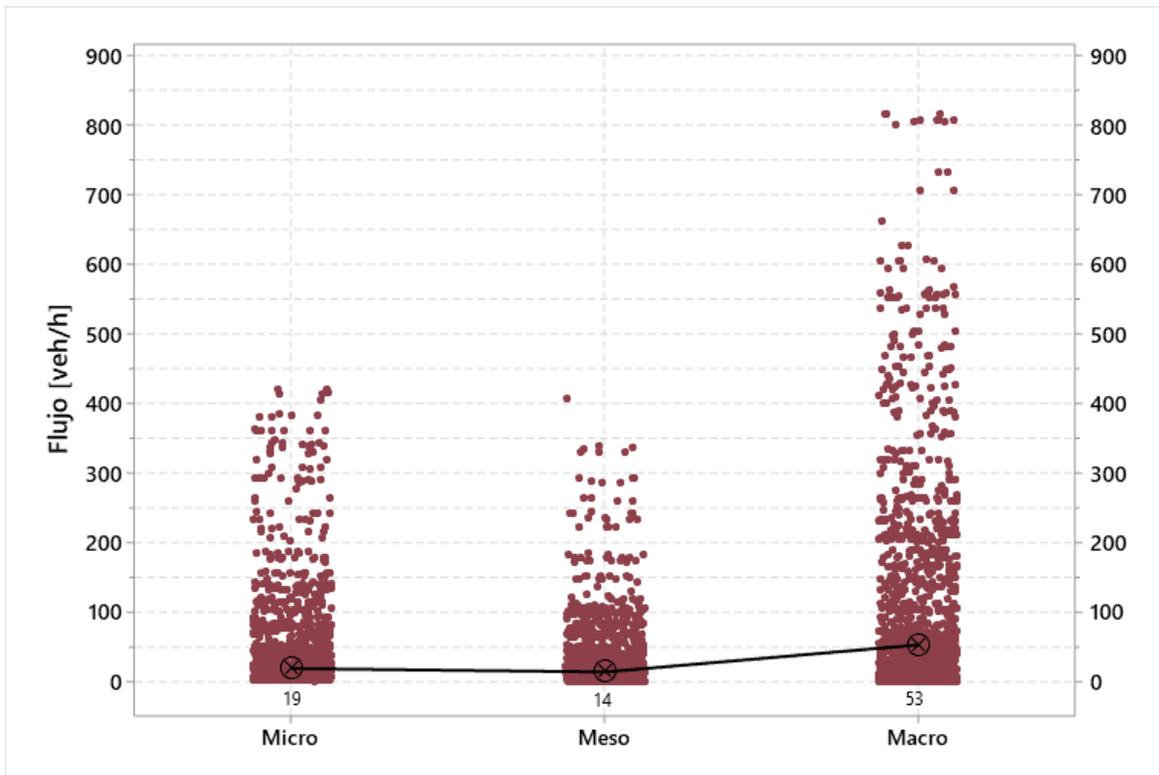
En la Figura 30 puede visualizar que tan alejados están los datos de flujo de cada una de las escalas de simulación respecto a su mediana, lo cual representa un complemento a las descripciones de los histogramas. Los flujos de las escalas Micro y Meso poseen separaciones similares, los datos se agrupan principalmente en magnitudes pequeñas, tal como se mencionó anteriormente. Sin embargo, entre las dos escalas, se puede observar que los datos Meso presentan una mayor concentración de los datos y la escala Micro, en algunos tramos viales supera los flujos de la escala Meso. Respecto a los resultados Macro, también existe una concentración importante

de los datos en valores de flujo pequeños, sin embargo, una mayor separación de estos es evidente, superando los flujos máximos de las dos escalas.

Los flujos de la escala micro poseen una curtosis de 6.16, seguidamente los flujos de la escala meso poseen una curtosis de 10.15 y finalmente los datos de la escala macro cuentan con una curtosis de 3.7. Esto indica que los flujos de la escala macro están muy poco concentrados alrededor de su media, seguido de los flujos meso y finalmente los flujos micro.

Los flujos se concentran en valores bajos debido a que una gran cantidad de tramos viales de la red de transporte no tienen viajes asignados según su modelo de simulación, es decir que los viajes en su mayoría se realizan por tramos viales o rutas muy específicos, lo cual obedece a la elección de las rutas más rápidas. Por otra parte, en la escala Macro, las rutas de asignación involucran una mayor cantidad de tramos viales diferentes.

En términos de variabilidad se tiene que los flujos micro poseen una desviación de 79.36 veh/h, los flujos meso poseen una desviación de 54.24 veh/h y los flujos macro cuentan con una desviación de 159.95 veh/h. En la macrosimulación, los modelos suelen utilizar valores promedio para representar el comportamiento del tráfico, lo que implica que no se tienen en cuenta las variaciones individuales de los vehículos. En cambio, en la microsimulación, los modelos suelen utilizar parámetros específicos para cada vehículo, lo que permite tener en cuenta las variaciones individuales.

Figura 30*Gráfico de valores individuales de flujo*

Nota: Elaboración propia.

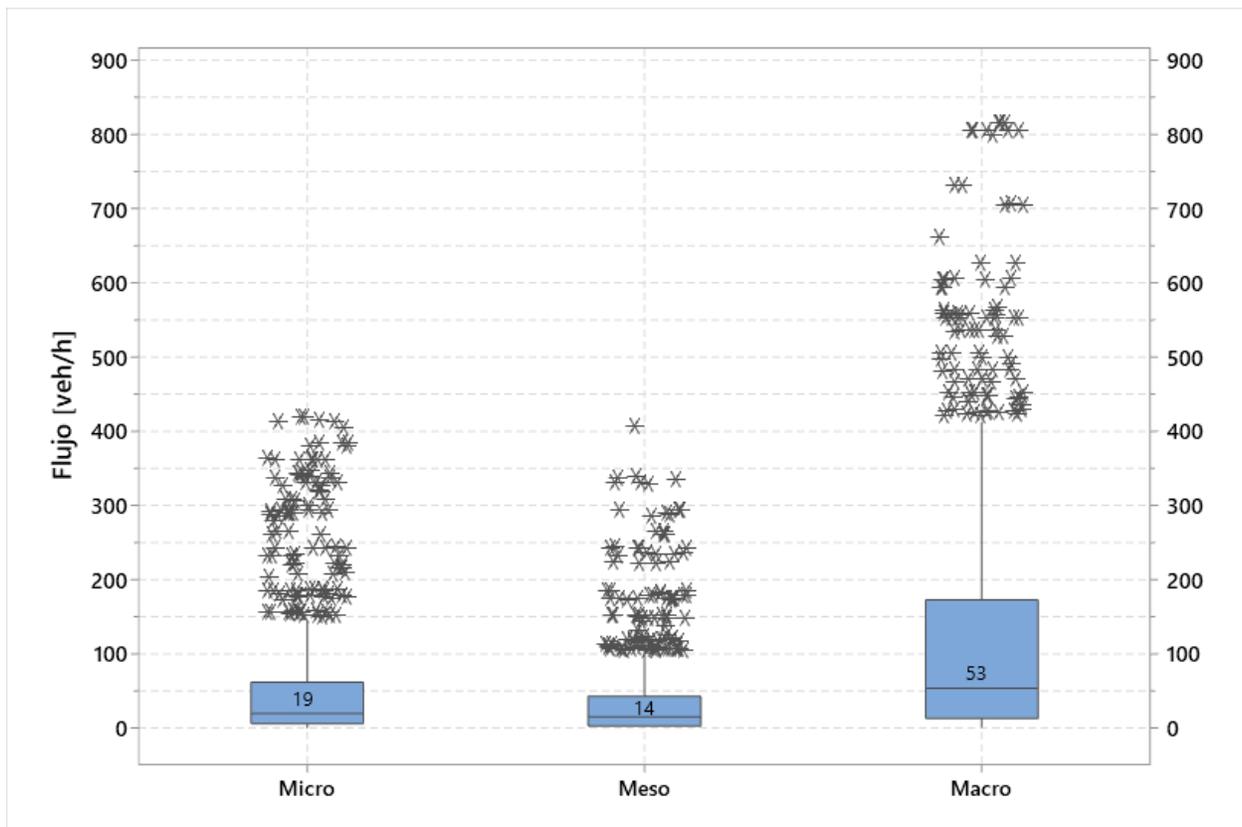
5.3.4. Gráficos de cajas y bigotes comparativos

Dados los diferentes niveles de concentración en los resultados de flujos totales, los gráficos de cajas y bigotes presentados en la Figura 31 cuentan con una gran cantidad de altos flujos atípicos en todas las escalas de simulación. Los resultados atípicos se presentan por encima de los respectivos bigotes debido a que tal como se ha mencionado anteriormente la mayoría de los flujos se concentran principalmente en magnitudes pequeñas.

Los resultados indican que en la escala Micro el 50% de los tramos viales no supera los 19 vehículos, en el caso de la escala Meso el 50% de los tramos viales no supera los 14 vehículos y

finalmente para la escala Macro el 50% de los segmentos viales no supera los 53 vehículos. La distribución de flujos de la escala Macro es superior a las otras dos escalas, es decir que los datos están menos concentrados debido a que en la red una mayor cantidad de tramos viales cuentan con flujos asignados; en segunda medida, los resultados micro poseen menor concentración que los resultados de la escala Meso.

Figura 31
 Grafica de caja grupal para flujos Micro, Meso y Macro



Nota: Elaboración propia.

5.4. Diagramas fundamentales del flujo de tráfico

La teoría postulada respecto a la forma de la curva en la que se relaciona la densidad y el correspondiente flujo de tráfico se conoce como el Diagrama Fundamental del Flujo de Tráfico, el cual obedece a un enfoque Macroscópico generalmente empleado en el análisis de autopistas en condiciones de flujo ininterrumpido. (Garber & Hoel, 2009). Con el fin estudiar el comportamiento entre los resultados de las diferentes escalas se analizaron los diagramas fundamentales para la Via Stendha, la cual es una vialidad doble calzada con especificaciones que permiten desplazamientos a altas velocidades de forma similar a una autopista (ver Figura 32).

Figura 32
Via Stendha – Corticella



Nota: Elaboración propia con base en Google Earth.

5.4.1. *Relación Velocidad – Densidad*

Existen una gran cantidad de modelos que intentan describir las relaciones entre las variables fundamentales: densidad, velocidad y flujo de los vehículos, sin embargo, hasta la fecha, la tarea de encontrar el mejor modelo que describe este comportamiento sigue abierta. Los modelos que poseen una mayor precisión lo hacen a costa de la simplicidad de este y el aumento en la cantidad de parámetros que deben medirse en campo (Romanowska & Jamroz, 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, para determinar la relación Velocidad – Densidad, se realizó el ajuste de los datos resultantes de velocidad y densidad de las escalas Micro y Meso al modelo lineal de Greenshields en el cual se tiene que:

$$\bar{u}_s = u_f - \frac{u_f}{k_j} k$$

Donde:

u_f : Velocidad media espacial a flujo libre.

k_j : Densidad de congestiónamiento.

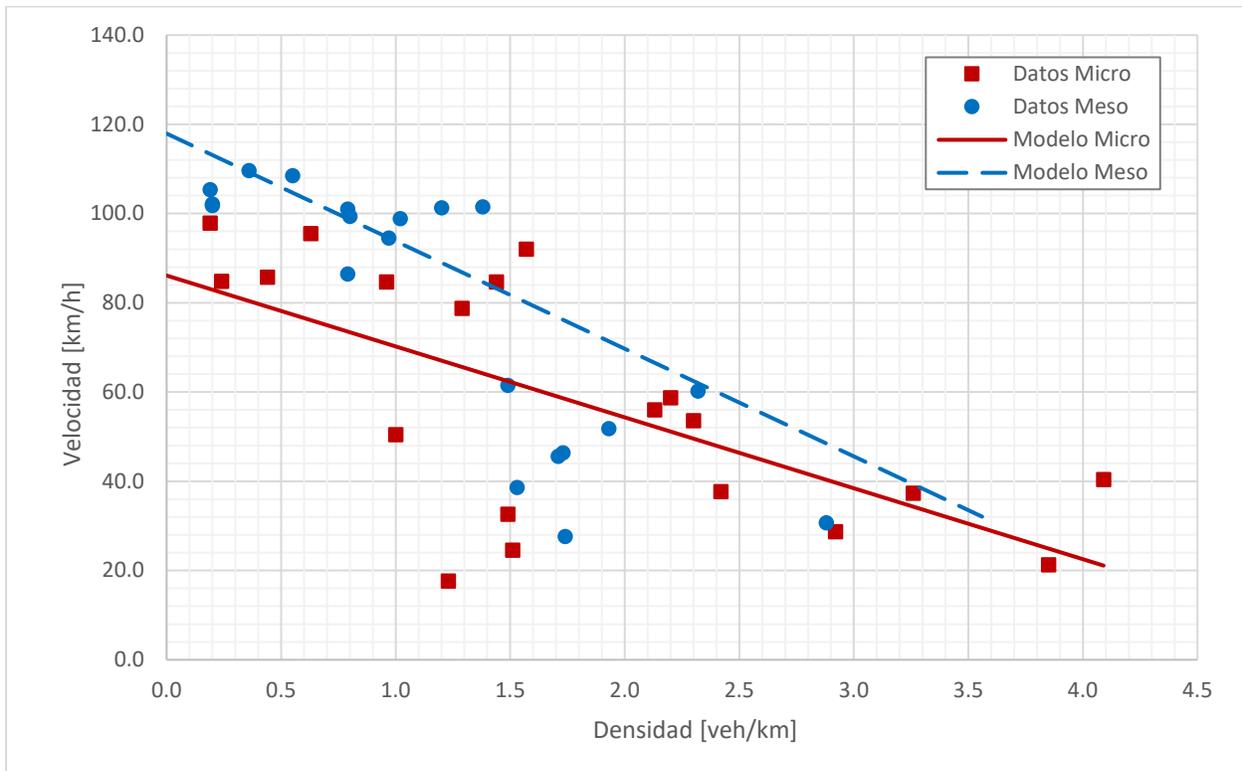
\bar{u}_s : Velocidad media espacial.

Una vez ajustados los datos de las dos escalas de simulación al modelo de Greenshields, se evaluó la correlación entre los grupos de datos. La representación gráfica de los resultados se presenta en la Figura 33. Los datos que más se correlacionan con el modelo lineal son los de la escala Meso con un 69.4% respecto al 42.7% de los datos Micro, lo cual indica que el modelo lineal construido con los datos Meso representa de forma más precisa el comportamiento de tráfico en la vialidad. Pese a esto, el patrón de los dos grupos de datos se asemeja al comportamiento

teórico fundamental del tráfico, en el cual a medida que aumenta la densidad vehicular, la velocidad disminuye.

La pendiente de las rectas representa la razón de cambio a la cual la velocidad disminuye respecto a la densidad. El modelo lineal Meso posee una mayor pendiente, esto significa que la densidad de congestión se alcanzará en un valor inferior respecto a la densidad de congestión del modelo Micro a pesar de que la velocidad inicial sea superior, es probable que, debido a este bajo nivel en las densidades de congestión, se propicie el aumento de congestión en los elementos aledaños, lo cual se presenta en la Figura 19. Por otra parte, la velocidad a flujo libre (velocidad inicial) en el modelo lineal Meso es superior respecto al modelo Micro, lo cual indica que en general en la escala Meso se pueden desarrollar altas velocidades cuando existen densidades bajas, mientras que en el caso de la escala Micro, a pesar de que existan bajas densidades las velocidades no llegarán a ser tan altas, esto es coherente con los resultados descritos en la sección de Histogramas comparativos.

Figura 33
Relación Velocidad vs Densidad



Nota: Elaboración propia.

5.4.2. Relación Flujo – Densidad

Debido a que en los resultados de simulación por evolución no se generan datos de flujo vehicular por periodos de tiempo, estos datos deben ser estimados empleando una variación del modelo de Greenshields, para esto debe relacionarse otra expresión fundamental:

$$q = k\bar{u}_s$$

Donde:

\bar{u}_s : Velocidad media espacial.

q : Flujo vehicular.

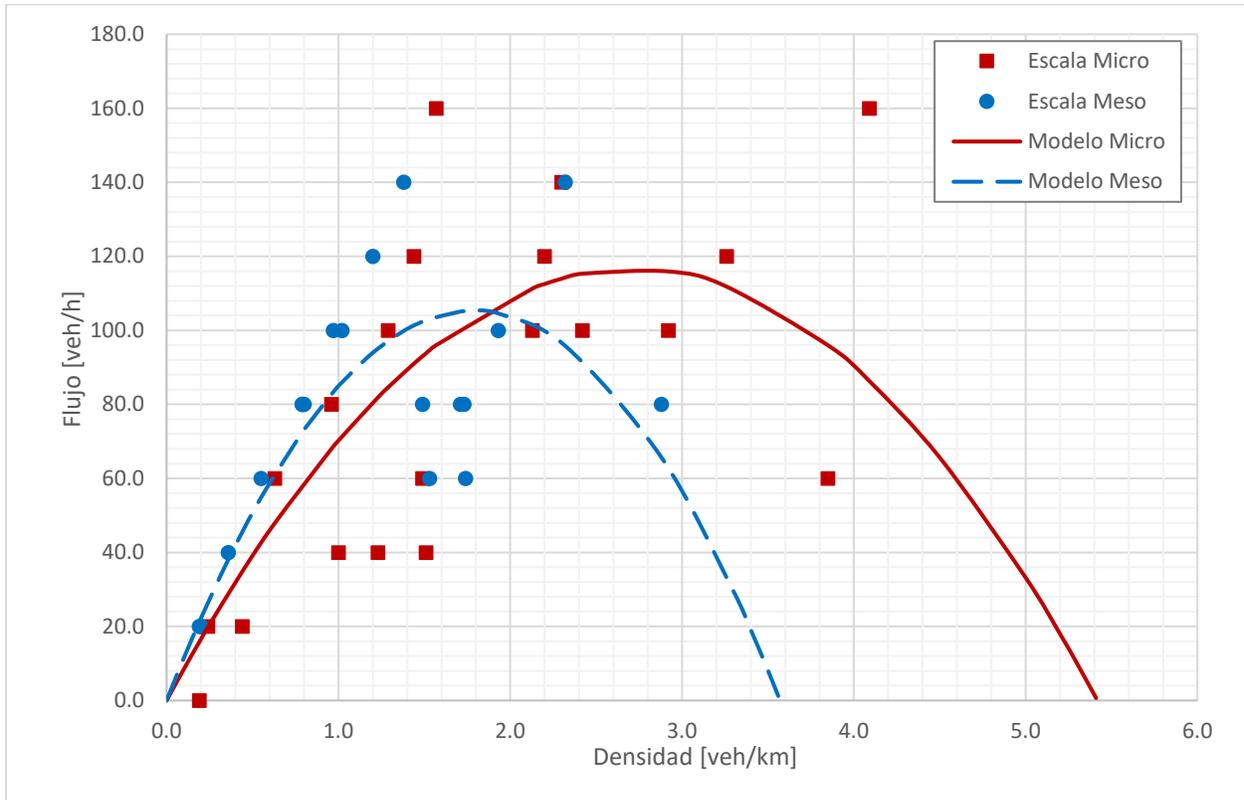
k : Densidad vehicular.

Con base en lo anterior, el modelo de Greenshields se convierte en la siguiente función parabólica:

$$q = u_f k - \frac{u_f}{k_j} k^2$$

Empleando la anterior función parabólica en la que se relaciona el flujo y la densidad se determinaron los flujos vehiculares para cada periodo de tiempo en las dos escalas de simulación y se representaron gráficamente en la Figura 34. Según la teoría de los diagramas fundamentales, la capacidad del sistema vial se encuentra representada por el punto más alto de flujo en la función parabólica (Garber & Hoel, 2009), esto ocurre cuando la densidad llega a los 2.7 veh/km con un flujo de 116.6 veh/h, a diferencia de la escala Meso, en la cual la capacidad del sistema se alcanza con una densidad de 1.8 veh/km y un flujo de 105.3 veh/h. Según los resultados obtenidos, el valor del flujo máximo en la función parabólica es muy bajo debido a que el corredor vial no cuenta con un amplio rango de datos en el cual puedan desarrollarse diferentes densidades, esto debido a que los datos de estudio pertenecen únicamente a un periodo de una hora durante el cual nunca se presentaron altas densidades. Por causa de lo anterior, el valor máximo de flujo en la función parabólica no cuenta con la cantidad suficiente de datos para representar la capacidad vial máxima del corredor analizado.

Figura 34
Relación Flujo vs Densidad



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 34 se evidencia que, si bien los datos entre las dos escalas son similares, difieren en algunos aspectos que pueden ser revisados desde sus respectivos modelos parabólicos. El porcentaje de correlación de los datos Micro con su respectivo modelo parabólico es de 51.4%, el cual es inferior respecto a la correlación de los datos Meso, que alcanzan un valor de 55.1% con su respectivo modelo parabólico. Por otra parte, es evidente que la escala Micro alcanza valores superiores de flujo y cuenta con un mayor rango de densidades antes de llegar a la densidad de

congestionamiento, caso totalmente contrario al modelo Meso, en donde para un menor rango de densidades se presenta un menor flujo máximo, una relación directa entre estos dos elementos.

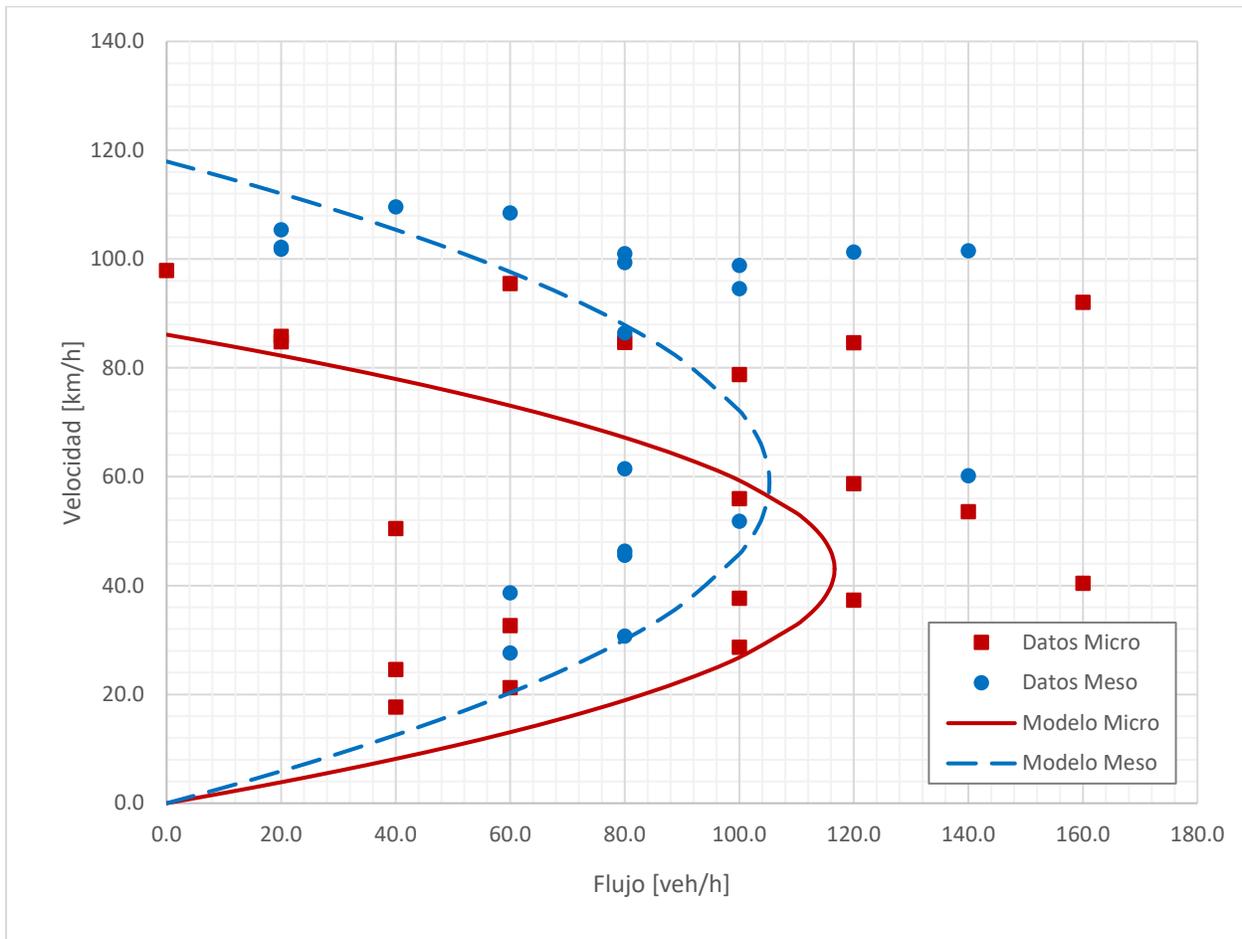
5.4.3. *Relación Flujo – Velocidad*

Nuevamente empleando el modelo de Greenshields es posible llegar a una expresión matemática que relaciona la velocidad y el flujo tal como se presenta a continuación:

$$\bar{u}_s = \frac{u_f}{2} \pm \frac{\sqrt{u_f^2 - 4 \left(\frac{u_f}{k_j}\right) q}}{2}$$

En la Figura 35 se presenta el modelo para la escala Micro y Meso junto con los datos correspondientes a cada escala. En los modelos graficados, la escala Micro cuenta con un flujo vehicular máximo a una velocidad inferior (116.63 veh/h y 43.1 km/h respectivamente), mientras que en la escala Meso se desarrollan velocidades superiores pero un flujo máximo inferior (59 km/h y 105.27 veh/h respectivamente). La tendencia de este comportamiento puede extrapolarse al comportamiento general de la red de transporte, los flujos resultantes Micro alcanzarán mayores magnitudes respecto a los flujos resultantes Meso, lo cual se evidencia en las figuras 14 y 15 respectivamente.

Figura 35
Relación Flujo vs Velocidad



Nota: Elaboración propia.

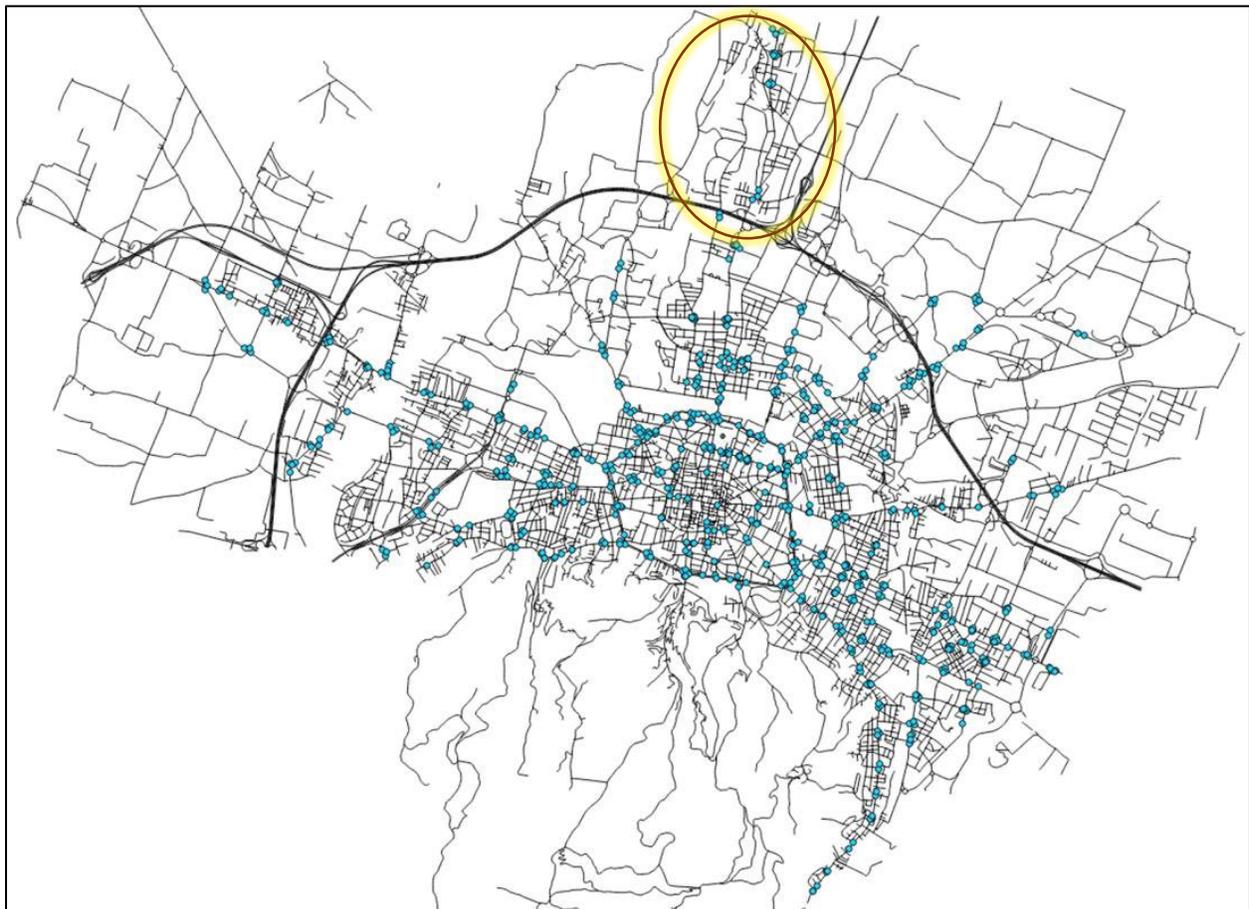
5.5. Comparación de resultados con datos reales

Durante el proceso de validación del escenario de Bolonia se emplearon datos de conteos vehiculares recopilados por los detectores de bucle. La distribución de los detectores tanto de Bolonia como de Corticella (sector encerrado con círculo amarillo) se ilustran en la Figura 36. Como se puede observar, para el distrito de Corticella no se cuenta con una gran cantidad de detectores (10 detectores), sumado a esto, es importante mencionar que los flujos medidos por los

detectores incluyen únicamente registros de automóviles, buses y camiones, es decir que no se registraron vehículos de dos ruedas como motocicletas o bicicletas, mientras que los resultados de flujos simulados si incluyen todas las categorías de vehículos.

Figura 36

Detectores dispuestos en el distrito de Corticella, Italia

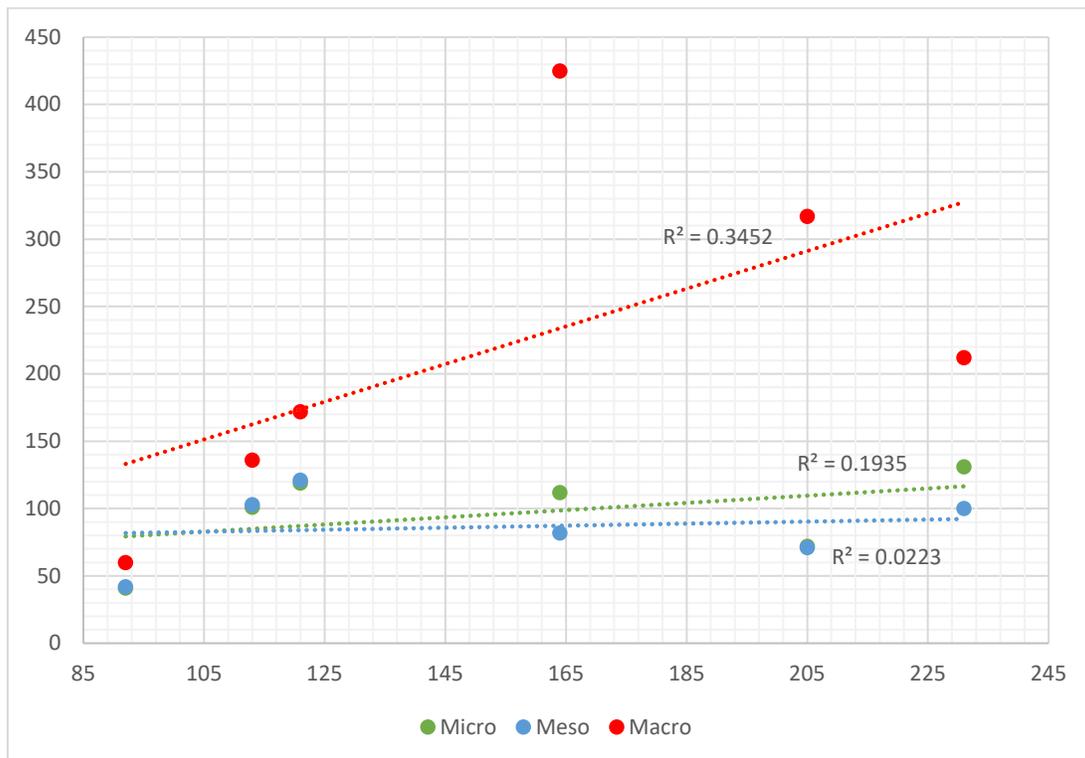


Nota: Elaboración propia.

Por otra parte, es importante mencionar que algunos detectores no se encontraban en funcionamiento, por lo cual fueron descartados, lo cual dejó un total de seis detectores con datos

registrados. En la Figura 37 se presenta la correlación existente entre los datos registrados por los detectores y los flujos simulados por cada una de las escalas. Se evidencia que la correlación existente entre los flujos de macrosimulación y los datos reales es la más alta, con 34.5%, en segunda medida la correlación de la microsimulación con los datos reales es de 19.3% y finalmente la correlación entre mesosimulación y datos reales es de 2.2%. Desafortunadamente estos resultados pueden no estar reflejando la tendencia real de la red de transporte en estudio debido principalmente a que la cantidad de datos evaluados es minúscula (seis registros) comparada con los 2947 tramos de carretera presentes en la red del distrito de Corticella.

Figura 37
 Correlación de datos reales con resultados simulados



Nota: Elaboración propia.

5.6. Discusión

El objetivo central de este trabajo fue identificar ventajas y desventajas en el uso de las técnicas de microsimulación de tráfico a gran escala respecto a meso y macrosimulaciones. Para alcanzar este fin, se trabajó sobre el escenario simulado del distrito de Corticella, perteneciente al Área Metropolitana de Bolonia, Italia. El escenario ha sido sometido a un detallado proceso de calibración y validación durante los últimos años por investigadores de la Universidad de Bolonia, fue construido empleando grandes bases de datos de acceso libre y, pese a que el escenario fue inicialmente construido desde una perspectiva micro, durante el desarrollo de este trabajo se ejecutaron simulaciones meso y macro para el mismo escenario. Los resultados indican que emplear una escala de simulación u otra puede influir notablemente sobre los resultados, por lo cual resulta determinante tener precaución al elegir que escala de simulación emplear en función de la envergadura de un proyecto y/o los objetivos de este.

5.6.1. Escenarios de microsimulación a gran escala

Durante el desarrollo del presente trabajo se contó con un escenario de simulación de tráfico a gran escala, el cual se configuró a conveniencia con el fin de generar resultados de simulaciones micro, meso y macro. Este escenario de simulación fue construido empleando grandes bases de datos abiertos; inicialmente la red de transporte fue obtenida desde Open Street Map, el cual es un proyecto colaborativo de fuente abierta en el que la misma comunidad es quien crea y edita los mapas, cuya información está siempre disponible al público general (OpenStreetMap Contributors, 2022).

El software empleado para simular el escenario de estudio fue SumoPy, el cual es, en términos generales, una interfaz gráfica e intuitiva del software SUMO, este es un software de código abierto que se puede utilizar de forma libre, por lo tanto, no hubo inversión económica en la adquisición de un simulador de transporte para la construcción del escenario.

La información referente a la demanda de transporte se obtuvo de fuentes públicas como la base de datos de la Especificación General de Alimentación en Tránsito (GTFS por sus siglas en inglés), el Desafío de Ciclismo Europeo llevado a cabo durante el año 2016, el censo poblacional del año 2001 y los conteos registrados por los detectores de inducción distribuidos por la ciudad; pese a que la información no es coherente en términos temporales ya que no fue recolectada durante el mismo periodo de tiempo, el escenario de simulación fue construido con una mínima inversión económica ya que no se requirió registro de información alguno (exceptuando las verificaciones de la red de transporte in situ), por lo tanto, este trabajo es una prueba de la existente posibilidad de construir escenarios de este nivel siempre y cuando se disponga de la información necesaria. La información es uno de los principales insumos para la construcción de escenarios de simulación independientemente de la escala, por esto, es imprescindible que se fomenten iniciativas que promuevan la recolección y disposición pública de información en las ciudades colombianas.

5.6.2. Resultados de micro, meso y macrosimulación

Los resultados del caso de estudio indican que las velocidades en la escala micro, son inferiores respecto a la escala meso (Figura 12), y estas velocidades a su vez son inferiores respecto a la escala macro (Figura 13), esto puede explicarse teniendo en cuenta que debido a que la

simulación micro evalúa vehículos de forma individual, la congestión se percibe en esta escala de una forma más pronunciada que en las otras escalas (en las cuales las unidades que se desplazan se perciben como paquetes de vehículos), de esta forma, la escala con menos congestión aparente es la macro, lo cual resulta coherente con la cantidad de flujo vehicular resultante, ya que la cantidad de vehículos por hora en la escala macro es superior, respecto a las escalas meso y micro.

Generalmente en escenarios de gran escala se emplean simulaciones mesoscópicas o macroscópicas, sin embargo, teniendo en cuenta los resultados anteriormente obtenidos sería conveniente emplear simulaciones micro a gran escala en estudios de gran relevancia o en los cuales la velocidad sea un factor determinante (por ejemplo, estudios de optimización de velocidades de viaje o estudios en los que se busque reducir los niveles de congestión), esto con el fin de evitar la estimación de datos demasiado optimistas (altos) con simulaciones de otras escalas.

Por otra parte, los resultados presentados de valores individuales de velocidad para la simulación macro (Figura 14) presentan agrupaciones de elementos con velocidades muy similares o constantes con una baja agrupación alrededor de la media en los resultados, esto se aleja notablemente de la realidad ya que en la vida real los vehículos individuales varían sus velocidades constantemente, lo cual influye en la congestión vehicular resultante, ya que esta se esparce como una onda que se propaga (diagramas espacio – temporales) (Maerivoet & de Moor, 2005).

5.6.3. Ventajas de la microsimulación a gran escala

La microsimulación de tráfico a gran escala puede permitir evaluar propuestas y diseños fuera del contexto local en el cual generalmente se evalúan, es decir, una modificación a la red de transporte puede generar un impacto ya sea positivo o negativo en los flujos del sector específico

donde se realiza la modificación, sin embargo, este ajuste también puede tener un impacto indirecto en un sector distante fuera del área específica del ajuste, lo cual generalmente se desprecia.

Los escenarios de gran escala pueden ser de gran utilidad para evaluar eventos que involucran grandes extensiones de área como por ejemplo rutas posibles o alternas de evacuación debido a incidentes impredecibles como incendios, terremotos, tormentas tropicales, derrumbes o protestas. En este tipo de escenarios estudiar el comportamiento de los conductores de forma individual puede influir de forma significativa en los resultados debido a la presencia de actores como los peatones.

Disponer de un escenario de gran escala reducirá los tiempos y costos en la elaboración de estudios de tránsito que involucren simulación ya que no será necesario realizar múltiples procesos de recolección de información para la construcción de simulaciones locales.

Respecto a la configuración semafórica, puede ser una herramienta de gran utilidad, esto debido a que será más sencillo optimizar los tiempos semafóricos pensando en un sistema de gran escala completamente conectado, se podrán evaluar las condiciones de flujo vehicular y congestión de todo el sistema o de grandes trayectos si se identifica el área de influencia de cada semáforo para tener en cuenta lo que sucede aguas arriba.

5.6.4. Desventajas de la microsimulación a gran escala

La información necesaria para la construcción de escenarios a gran escala es abundante, se requiere información geométrica y característica de la red de transporte, patrones específicos de viaje de la población incluyendo los modos de transporte preferidos y los horarios en los cuales realizan las actividades cotidianas. Este tipo de información no es fácil de obtener, si se recolecta

en campo demanda una gran cantidad de recursos humanos y económicos de los cuales generalmente no se dispone en todos los proyectos.

Debido a la gran cantidad de información que se opera durante la construcción de estos escenarios, es necesario contar con profesionales expertos en el manejo de bases de datos que permitan llevar un registro de control de cambios a fin de llevar un seguimiento adecuado de cada una de las modificaciones que se realicen a los datos originales, esto sin mencionar el procesamiento de los resultados obtenidos en el proceso de simulación.

Gracias a la gran extensión de la red de transporte el proceso de calibración puede ser difícil y dispendioso en términos computacionales, debido a esto es recomendable emplear algoritmos de calibración automática, esto a su vez demanda conocimientos de programación que generalmente los expertos en ingeniería de transporte no poseen (Hollander & Liu, 2008).

La ejecución de simulaciones micro a gran escala demandará una gran cantidad de recursos computacionales (mucho más de lo que se demanda en una microsimulación convencional), cada vez más será imprescindible que los expertos cuenten con equipos de cómputo que generalmente tienen un alto costo económico.

5.6.5. Trabajos futuros

Como un estudio complementario a este trabajo, podría ser interesante estudiar diversas modificaciones en la red vial o métodos de gestión de tráfico y el nivel de impacto en términos de área que cada una de las escalas de simulación podría generar. Por otra parte, podría considerarse ampliar el rango de tiempo cubierto por el escenario a fin de identificar patrones de

comportamiento durante un día completo para una ciudad, e identificar estrategias que podrían funcionar durante periodos de tiempo específicos.

También podría pensarse en estudiar la optimización de todo el sistema de transporte público con base en el análisis de frecuencias, tiempos de viaje y la población virtual con la que cuenta el escenario. Además, sería posible estudiar a detalle los beneficios de la implementación de sistemas de mayor envergadura como lo es un sistema de tranvía o metro. Esto podría hacerse por etapas, habilitando inicialmente algunas líneas de tranvía para hacer seguimiento del comportamiento del sistema de transporte particular.

En presente trabajo fue realizado empleando información de la ciudad de Bolonia, Italia principalmente debido a la gran extensión de información disponible, sin embargo, sería de interés construir un escenario de simulación micro a gran escala para la ciudad de Bucaramanga o su área metropolitana a fin de potenciar la investigación de modelado a nivel local. Para que esto sea una realidad es necesario llevar a cabo estudios complementarios como lo es la construcción de algoritmos de calibración automática que puedan ser de utilidad en la calibración de modelos micro de cualquier escala.

6. Conclusiones

- El avance tecnológico de la computación y la cada vez más compleja dinámica del transporte en los centros urbanos, demandan la construcción de escenarios de simulación que generen resultados cada vez más cercanos a los sistemas reales, de esta forma la toma de decisiones será un proceso mucho más certero en materia de movilidad y transporte, con base en esto, puede concluirse que siempre y cuando se disponga de la información requerida a un bajo costo, los escenarios de simulación deberían ser construidos en una escala micro.
- Los valores de curtosis para los resultados de velocidad indican que en función de cuanto mayor sea la escala de simulación, los resultados tendrán un menor grado concentración alrededor de su media, es decir, que la mayor concentración los tienen los resultados de la escala micro, seguido por los resultados de la escala meso y finalmente la escala macro.
- El escenario de simulación estudiado descrito a lo largo de este proyecto fue construido, calibrado y validado empleando diversas fuentes públicas de Big Data existentes para la ciudad de Bolonia (Italia) y un simulador de código abierto, esto sin duda representa un avance hacia la construcción de escenarios de simulación cada vez más complejos, completos y de bajo costo, por lo tanto, puede concluirse que si es posible construir escenarios de microsimulación a gran escala con una baja inversión económica.
- Debido a la gran cantidad de parámetros que se encuentran presentes en todas las escalas de simulación y a la dificultad para medirlos, debe emplearse la cantidad mínima de parámetros de tal forma que se pueda describir el comportamiento del área de estudio, en el caso en el cual sea imprescindible el uso de una gran cantidad de parámetros, es recomendable emplear

algoritmos de calibración automática, con el fin de alcanzar la convergencia de una forma más eficaz.

- La comparación de los resultados de velocidad obtenidos de las diferentes escalas de simulación indica que en términos generales las simulaciones meso y macro tienden a mayorar los resultados de velocidades respecto a las velocidades micro en toda la red de transporte.
- Para el análisis de diagramas fundamentales de flujo de tráfico es de vital importancia que la información de entrada cuente con los datos suficientes para generar una distribución de densidades variada, es decir, que los registros se realicen durante un intervalo de tiempo lo suficientemente grande como para permitir el desarrollo de un amplio rango de densidades en la vialidad, de lo contrario, los diagramas resultantes no representarán los flujos máximos admisibles en la vialidad (capacidad del sistema vial).
- Los detectores dispersos en la ciudad únicamente midieron datos de automóviles, buses y camiones, es decir, que los vehículos de dos ruedas no fueron detectados, mientras que en la simulación si se generaron flujos con vehículos de dos ruedas, lo cual influye de manera directa en la correlación existente entre los datos observados y los datos simulados.
- Debido a que la microsimulación a gran escala demandan una gran cantidad de información, no siempre se dispuso de esta en las condiciones necesarias, un ejemplo de esto son los datos de conteo de vehículos por los detectores, esta información fue recolectada durante el año 2014, mientras que la demanda de transporte fue calibrada para el año 2018.
- El uso de SumoPy como una extensión de SUMO permite a los expertos en ingeniería de transporte acceder de forma gratuita e intuitiva a la construcción de escenarios de

microsimulación para generar resultados analizables con las mismas herramientas integradas en el software.

- Debido al costo y a la gran cantidad de información necesaria para construir simulaciones a gran escala, es de vital importancia promover en Colombia iniciativas encaminadas a la recolección y divulgación de información aprovechable para que desde la academia se aporten investigaciones que contribuyan de forma práctica a la población en general.
- La construcción de una simulación de tráfico para una ciudad completa puede aportar de forma significativa a la planificación y gestión urbana, cuanto más detallado se tenga en cuenta el comportamiento todo el sistema de transporte, las acciones globales que se tomen tendrán un mayor impacto en el todo el sistema, ya que este estará definido como un solo sistema.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed, K., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., & Mishalani, R. (1996). *MODELS OF FREEWAY LANE CHANGING AND GAP ACCEPTANCE BEHAVIOR*.
- Ahmed, K. I. (1999). *Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior*.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata Xagoya University, A., & Sugiyarna, J. Y. (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. In *PHYSICAL REVIEW E* (Vol. 51, Issue 2).
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation (International Series in Operations Research & Management Science, 145)*. <http://www.springer.com/series/6161>
- Barcelo, J., García, D., Barceló, J., Casas, J., García, D., & Perarnau, J. (2005). *Methodological notes on combining macro, meso and micromodels for transportation analysis*. <https://www.researchgate.net/publication/242154775>
- Benjaafar, S., Dooley, K., & Setyawan, W. (1997). *Cellular Automata for Traffic Flow Modeling Center for Transportation Studies 200 Transportation and Safety Building Final Report 1996*.
- Bourrel, E., & Lesort, J.-B. (2003). Mixing Microscopic and Macroscopic Representations of Traffic Flow Hybrid Model Based on Lighthill-Whitham-Richards Theory. *Transportation Research Record*, 193–200.
- Cetin, N., Burri, A., & Nagel, K. (2003). A Large-Scale Agent-Based Traffic Microsimulation Based On Queue Model. *Swiss Transport Research Conference*.

- Chen, H., You, Y. S., Zhou, J. B., Wang, L., & Shang, Z. H. (2013). A simplified approach to estimate the urban expressway capacity after traffic accidents using a micro-simulation model. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/656345>
- Codeca, L., Frank, R., Faye, S., & Engel, T. (2017). Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario: Traffic Demand Evaluation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(2), 52–63. <https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2666585>
- Das, A. K., & Chattaraj, U. (2022). Cellular Automata Model for Lane Changing Activity. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. <https://doi.org/10.1007/s13177-022-00302-8>
- Das, S., Bowles, B. A., Houghland, C. R., Hunn, S. J., & Zhang, Y. L. (1999). Microscopic simulations of freeway traffic flow. *Proceedings of the IEEE Annual Simulation Symposium*. <https://doi.org/10.1109/simsym.1999.766457>
- Dumbuya, A., Booth, A., Reed, N., Kirkham, A., Philpott, T., Zhao, J., & Wood, R. (2009). Complexity of traffic interactions: Improving behavioural intelligence in driving simulation scenarios. *Understanding Complex Systems*, 2009, 201–209. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88073-8_17
- Eissfeldt, N. G. (2004). *Vehicle-based modelling of traffic Theory and application to environmental impact modelling*.
- Ennio Cascetta. (2001). *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods* (1st ed., Vol. 49). Springer New York, NY.
- Erdmann, J. (2015). SUMO's Lane-Changing Model. In M. Behrisch & M. Weber (Eds.), *Lecture notes in control and information sciences* (pp. 105–123).

- Federal Highway Administration. (2019). *2019 VERSION: Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version*.
https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/sect5.htm
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2009). *Traffic and highway engineering*. Cengage Learning.
- Gazis, D. C., Herman, R., & Rothery, R. W. (1961). Nonlinear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research*, 9(4), 545–567.
- German Aerospace Center (DLR). (2022, December 20). *Car-Following Models*.
https://sumo.dlr.de/docs/Definition_of_Vehicles%2C_Vehicle_Types%2C_and_Routes.html#car-following_models
- German Aerospace Center (DLR) and others. (2022a). *Marouter*.
<https://sumo.dlr.de/docs/marouter.html>
- German Aerospace Center (DLR) and others. (2022b). *Meso*.
<https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Meso.html>
- Gipps, P. G. (1981). A BEHAVIOURAL CAR-FOLLOWING MODEL FOR COMPUTER SIMULATION. In *Tmnrpn Res.-II*.
- Gipps, P. G. (1986). *A MODEL FOR THE STRUCTURE OF LANE-CHANGING DECISIONS* (Vol. 20, Issue 8).
- Giuffrè, T., Trubia, S., Canale, A., & Persaud, B. (2017). Using microsimulation to evaluate safety and operational implications of newer roundabout layouts for European Road networks. *Sustainability (Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/su9112084>
- Gurney, K. (1997). *An introduction to neural networks*.

- Halati, A., Lieu, H., & Walker, S. (1997). CORSIM-corridor traffic simulation model. *Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities*, 570–576. <https://trid.trb.org/view/576076>
- Hidas, P. (2005). Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(1), 37–62. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.12.003>
- Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, 35(3), 347–362. <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9156-2>
- Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. L. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4), 283–303. <https://doi.org/10.1243/09596510111541120>
- Horiguchi, R., & Kuwahara, M. (2005). The art of the utilization of traffic simulation models: How do we make them reliable tools? *Operations Research/ Computer Science Interfaces Series*, 31, 131–166. https://doi.org/10.1007/0-387-24109-4_5
- Huang, Z., Zhang, Z., Li, H., Qin, L., & Rong, J. (2019). Determining Appropriate Lane-Changing Spacing for Off-Ramp Areas of Urban Expressways. *Sustainability*, 11(7), 2087. <https://doi.org/10.3390/su11072087>
- Istituto Nazionale di Statistica. (2004). *Censimento popolazione e abitazioni 2001*. <https://www.istat.it/it/archivio/3847>
- Jepsen, M. (1998). *On the speed-flow relationships in road traffic: a model of driver behaviour*.
- Kerner, B. S. (2009). Introduction to modern traffic flow theory and control: The long road to three-phase traffic theory. In *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The*

- Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-02605-8>
- Kerner, B. S., & Klenov, S. L. (2006). Deterministic microscopic three-phase traffic flow models. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 39(8), 1775–1809.
<https://doi.org/10.1088/0305-4470/39/8/002>
- Kerner, B. S., & Rehborn, H. (1996). Experimental features and characteristics of traffic jams. In *COMMUNICATIONS* (Vol. 53, Issue 2).
- Kesting, A., Treiber, M., & Helbing, D. (2007). General lane-changing model MOBIL for car-following models. *Transportation Research Record*, 1999, 86–94.
<https://doi.org/10.3141/1999-10>
- Kita, H. (1998). A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis. *Transportation Research Part A*, 305–3012.
- Kita, H., & Fukuyama, K. (1999). *A merging-giveway behavior model considering interactions at expressway on-ramps*.
- Kita, H., & Fukuyama, K. (2002). A Game Theoretic Analysis of Merging-Giveway Interaction: A Joint Estimation Model. In *Transportation and Traffic Theory in the 21 st Century* (pp. 503–518). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9780585474601-025>
- Krauß, S. (1998). *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*.
- Laval, J. A., & Leclercq, L. (2010). A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. *Philosophical Transactions of the Royal*

- Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928), 4519–4541.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0138>
- Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D., & Varga, I. (2020). The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters*, 12(8), 540–549. <https://doi.org/10.1080/19427867.2019.1662561>
- Ma, X. (2006). *Toward An Integrated Car-following and Lane-changing Model by A Neural Fuzzy Approach*.
- Maerivoet, S., & de Moor, B. (2005). *Traffic Flow Theory*. <http://www.esat.kuleuven.be/scd>
- McDonald, M., Wu, J., & Brackstone, M. (1997). Development of a fuzzy logic based microscopic motorway simulation model. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 82–87. <https://doi.org/10.1109/itsc.1997.660454>
- Mobility Data. (2022). *General Transit Feed Specification*. <https://gtfs.org/>
- Moridpour, S., Rose, G., & Sarvi, M. (2009). Modelling the heavy vehicle drivers' lane changing decision under heavy traffic conditions. *Road and Transport Research*, 18(4).
- Moridpour, S., Sarvi, M., & Rose, G. (2010). Lane changing models: A critical review. In *Transportation Letters* (Vol. 2, Issue 3, pp. 157–173). Maney Publishing.
<https://doi.org/10.3328/TL.2010.02.03.157-173>
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12), 2221–2229. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>
- Nagel, K., Wolf, D. E., Wagner, P., & Simon, P. (1998). *Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach*.

- National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. (2010). *HCM 2010 : highway capacity manual. Vol. 2*. Transportation Research Board.
- Oketch, T., Eng, P., & Carrick, M. (2005). *Calibration and Validation of a Micro-Simulation Model in Network Analysis*.
- Olstam, J., & Tapani, A. (2004). *Comparison of Car-following models*.
<https://www.researchgate.net/publication/265198439>
- OpenStreetMap Contributors. (2022). *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/about>
- Ossen, S., & Hoogendoorn, S. P. (2006). Multi-anticipation and heterogeneity in car-following empirics and a first exploration of their implications. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1615–1620.
<https://doi.org/10.1109/itsc.2006.1707455>
- Pipes, L. A. (1953). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), 274–281. <https://doi.org/10.1063/1.1721265>
- R. Wiedemann. (1974). *simulation des Straßenverkehrsflusses*.
- Rahman, M., Chowdhury, M., Xie, Y., & He, Y. (2013). Review of microscopic lane-changing models and future research opportunities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4), 1942–1956. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2272074>
- Robinson, R. M., Collins, A. J., Jordan, C. A., Foytik, P., & Khattak, A. J. (2018). Modeling the impact of traffic incidents during hurricane evacuations using a large scale microsimulation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1159–1165.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.013>

- Romanowska, A., & Jamroz, K. (2021). Comparison of traffic flow models with real traffic data based on a quantitative assessment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21).
<https://doi.org/10.3390/app11219914>
- Ross, T. J. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications: Third Edition. In *Fuzzy Logic with Engineering Applications: Third Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781119994374>
- Sandesh Uppoor, & Marco Fiore. (2011). Large-scale Urban Vehicular Mobility for Networking Research. *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*.
- Schakel, W., Knoop, V., & van Arem, B. (2012). Integrated lane change model with relaxation and synchronization. *Transportation Research Record*, 2316, 47–57.
<https://doi.org/10.3141/2316-06>
- Schweizer, J., Poliziani, C., Rupi, F., Morgano, D., & Magi, M. (2021). Building a large-scale micro-simulation transport scenario using big data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi10030165>
- Schweizer, J., Rupi, F., Filippi, F., & Poliziani, C. (2018). *Generating activity based, multi-modal travel demand for SUMO*. 2, 118–101. <https://doi.org/10.29007/794z>
- The Challenge - Cycling Challenge*. (2022). <https://cyclingchallenge.eu/>
- Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., & Ben-Akiva, M. (2007). Integrated driving behavior modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(2), 96–112.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.02.002>
- Treiber, M., & Helbing, D. (2002). *Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell* FuturICT View project *Quasiexperiment: Dynamics of valenced messages*

in naturalistic chat View project Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell. <http://www.mtreiber.de/MicroApplet/>

Treiber, M., & Helbing, D. (2003). Memory effects in microscopic traffic models and wide scattering in flow-density data. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 68(4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.046119>

Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *PHYSICAL REVIEW E*, 62(2). <http://www.m.treiber.de/>.

Treiber, M., & Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics - Data, Models and Simulation* | Martin Treiber | Springer. Springer US. <http://www.springer.com/us/book/9783642324598>

Treiber, M., Kesting, A., & Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 360(1), 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.05.001>

Ulak, M. B., Ozguven, E. E., Moses, R., Sando, T., Boot, W., AbdelRazig, Y., & Sobanjo, J. O. (2019). Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulation based analysis for an unsignalized T-intersection. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(5), 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.004>

Valladares, A. (2016). “Comparación de un enfoque macroscópico y otro microscópico al estimar las demoras por la congestión urbana” [Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/51870/>

- van Arem, B., van Driel, C. J. G., & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429–436. <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>
- van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Vuik, K., & Hoogendoorn, S. (2014). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
- Wilson, R. E. (2008). Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1872), 2017–2032. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0018>
- Wu, J., Brackstone, M., & McDonald, M. (2000). Fuzzy sets and systems for a motorway microscopic simulation model. *Fuzzy Sets and Systems*, 116(1). [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00038-X)
- Zhang, R., Li, F., Yu, X., Zhang, Z., You, F., & Liu, T. (2015). A Review on Lane Changing for Intelligent Vehicle. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 8(3), 184–194. <https://doi.org/10.2174/2212797608666150813001949>
- Zheng, Z. (2014). Recent developments and research needs in modeling lane changing. *Transportation Research, Series B: Methodological*, 16–32.
- Zhu, H. B., Lei, L., & Dai, S. Q. (2009). Two-lane traffic simulations with a blockage induced by an accident car. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 388(14), 2903–2910. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2009.01.040>

Apéndices

Apéndice A. Paquete de simulación de transporte SumoPy

Apéndice B. Modelo de simulación del Área Metropolitana de Bolonia, Italia

Apéndice C. Modelo de simulación de Corticella, Italia

Apéndice D. Resultados de simulación micro, meso y macro sin procesar

Apéndice E. Resultados procesados en Minitab

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS