

Identificación de los parámetros esenciales en el proceso de calibración de modelos de transporte que se ajusten a las particularidades de los proyectos de movilidad y transporte del área metropolitana de Bucaramanga.

Geovany Leonardo Moscote Bayona

Jorge Esteban Rodríguez Ramírez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Yerly Fabián Martínez Estupiñán

Doctor en Ingeniería de Transporte y Logística

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Bucaramanga
2026

Agradecimientos

Primeramente, a mis padres y a mi hermana, por su cariño incondicional y apoyo a las decisiones que tomo, sin ellos nada habría sido posible. A las amistades que formaron parte de todo este proceso, por su compañía en una etapa más de mi vida. A los que, pese a la distancia, han hecho sentir su calor y hacen más ameno el viaje.

Geovany Leonardo Moscote Bayona

Agradezco en primer lugar, a Dios, por ser mi fuente de energía ante los momentos duros. A la Universidad Industrial de Santander, por ofrecerme un espacio de formación y crecimiento. A los docentes por su guía, al director de tesis, Yerly Fabián Martínez Estupiñán, por su apoyo y paciencia. A mis amigos por las risas y a mis compañeros por su compañía. Finalmente, mi más grande agradecimiento a mi familia, por su amor, los valores y enseñanzas que son pilares en mi vida.

Jorge Esteban Rodríguez Ramírez

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General.....	10
1.2 Objetivos Específicos.....	10
2. Revisión de la literatura	10
2.1 Categorización de artículos.....	13
3. Caracterización de movilidad del AMB	19
4. Condiciones de movilidad del AMB.....	21
4.1 Tiempos de viajes	21
4.2 Número de viajes	22
4.3 Horarios de viaje.....	23
4.4 Propósitos.....	24
4.5 Proyectos de movilidad en el AMB	24
5. Selección de metodologías aplicables al AMB.....	29
5.1 Tráfico heterogéneo	30
5.2 Manejo de datos reales.....	30
5.3 Contexto urbano.....	31
5.4 Explicación de metodología.....	31
5.5 Uso de parámetros.....	31
5.6 Resultado selección para AMB.....	31
5.7 Métricas de calibración en metodologías escogidas	35
6. Intersección simulada.....	36
6.1 Modelado intersección	38
6.2 Elección metodología para la intersección	39
6.3 Descripción metodología aplicada.....	41
6.4 Resultados calibración	44
7. Conclusiones	46
8. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	50
Apéndices.....	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Resultados de búsqueda en bases de datos.</i>	11
Tabla 2 <i>Artículos seleccionados.</i>	13
Tabla 3 <i>Parámetros más usados investigaciones aplicadas.</i>	17
Tabla 4 <i>Parámetros más usados estudios teóricos.</i>	18
Tabla 5 <i>Cantidad de viajes diarios en principales modos de transporte en el AMB.</i>	22
Tabla 6 <i>Hora máxima demanda en estaciones maestras.</i>	23
Tabla 7 <i>Proyectos de Infraestructura vial reportados en el AMB.</i>	25
Tabla 8 <i>Calificaciones estudios según criterio para AMB.</i>	32
Tabla 9 <i>Metodologías seleccionadas como afines para el AMB.</i>	35
Tabla 10 <i>Calificación metodologías según criterio para intersección modelada.</i>	40
Tabla 11 <i>Descripción de parámetros modificados en el software Vissim.</i>	41
Tabla 12 <i>Resultados más altos prueba ANOVA</i>	45
Tabla 13 <i>Mejor configuración de parámetros encontrada.</i>	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Proporción artículos filtrados.</i>	11
Figura 2 <i>Mapa bibliométrico de palabras claves generado con la herramienta VOSviewer.</i>	12
Figura 3 <i>Modos de transporte predominantes.</i>	19
Figura 4 <i>Cantidad de proyectos realizados por año de actividad.</i>	27
Figura 5 <i>Zona de intersección elegida.</i>	36
Figura 6 <i>Intersección Carrera 27 – Calle 56, Bucaramanga.</i>	37
Figura 7 <i>Intersección modelada en Vissim</i>	38
Figura 8 <i>Diagrama de flujo metodología aplicada</i>	43
Figura 9 <i>Gráfico de progresión del error absoluto porcentual durante la aplicación del algoritmo genético.</i>	45

Resumen

Título: Identificación de los parámetros esenciales en el proceso de calibración de modelos de transporte que se ajusten a las particularidades de los proyectos de movilidad y transporte del área metropolitana de Bucaramanga.*

Autor: Geovany Leonardo Moscote Bayona, Jorge Esteban Rodríguez Ramírez.**

Palabras Clave: calibración, movilidad, parámetros, software, Vissim.

Descripción: Tomar decisiones en proyectos de infraestructura de transporte puede resultar muy difícil y crítico para el desarrollo de cualquier ciudad, es por eso que suele utilizarse como soporte de dichas decisiones las herramientas de simulación de transporte que permitan identificar de manera anticipada los posibles impactos positivos y negativos que tendrá cualquier proyecto de infraestructura de transporte una toma de decisiones adecuada a partir del uso de dichas herramientas debe partir de procesos de calibración adecuados que reflejen las verdaderas condiciones actuales y futuras del proyecto en análisis. Es así como este trabajo de investigación buscó contribuir al análisis de la importancia de contar con modelos de simulación en transporte para el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura de transporte, tomando como caso de estudio el área metropolitana de Bucaramanga (AMB). Por lo tanto, en este trabajo se analizaron y definieron los parámetros esenciales para el proceso de calibración de modelos de simulación en transporte que se ajusten a las particularidades de los proyectos de movilidad y transporte propuestos o desarrollados en el AMB en los últimos 20 años, para relacionarlos con los documentos que presentan similitud a las particularidades de movilidad del AMB seleccionados en la revisión de literatura global. Finalmente se seleccionó de los estudios analizados cuál metodología de calibración era la que más se adecuaba a las condiciones de movilidad del AMB y se implementó mediante un ejercicio específico de una intersección vial en el casco urbano del AMB.

Durante el proceso de desarrollo de esta investigación se identificó que los proyectos de infraestructura de transporte y movilidad en el área metropolitana de Bucaramanga carecen de datos actualizados sobre su planificación y evaluación y no hay trazabilidad que muestre que se utilizaron herramientas de simulación para su evaluación previa, por ende, fue necesario analizar proyectos realizados en diferentes ciudades nacionales e internacionales donde se identificaron los análisis de transporte previos que eran aplicados, así como las metodologías de simulación en transporte y calibración usadas. Para el análisis se seleccionó la intersección semaforizada de la carrera 27 con calle 56 en el casco urbano de Bucaramanga. Los datos utilizados fueron proyecciones realizadas a partir de aforos tomados en el año 2008, partiendo de las estadísticas de crecimiento de todos los modos de transporte presentes en base de datos de movilidad del AMB y alcaldías que lo integran. Una vez recopilada toda la información necesaria se utilizó la versión educacional del software de modelación en transporte VISSIM que permitió la simulación completa de la intersección calibrando los resultados mediante el método del algoritmo genético que fue el método que resultó seleccionado después del análisis de metodologías.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Yerly Fabián Martínez Estupiñán. Doctorado en Ingeniería de Transporte y Logística.

Abstract

Title: Identification of essential parameters in the calibration process of transportation models that adapt to the specificities of mobility and transportation projects in the metropolitan area of Bucaramanga.*

Author: Geovany Leonardo Moscote Bayona, Jorge Esteban Rodríguez Ramírez**

Key Words: calibration, mobility, parameters, software, Vissim.

Description: Making decisions regarding transportation infrastructure projects is complex and critical for urban development. Consequently, simulation tools are frequently employed to support these decisions, as they enable the early identification of potential impacts. Effective decision-making relies on rigorous calibration processes that accurately reflect the current and future conditions of the project.

This research contributes to the analysis of transportation simulation models for infrastructure development, using the Bucaramanga Metropolitan Area (AMB) as a case study. The study identified essential parameters for the calibration process, tailored to the specific mobility characteristics of projects developed in the AMB over the last 20 years. These parameters were then correlated with similar cases identified in a global literature review. Finally, the most suitable calibration methodology for the AMB's mobility conditions was selected and implemented through a practical exercise at a road intersection.

The research revealed that transportation infrastructure projects in the AMB often lack updated planning data and documented traceability regarding the use of simulation tools for prior evaluation. Therefore, it was necessary to analyze international and national projects where simulation and calibration methodologies were successfully applied. For the empirical analysis, the signalized intersection at Carrera 27 and Calle 56 in Bucaramanga was selected. The study utilized projections based on 2008 measurements, adjusted with growth statistics for all transport modes from the AMB mobility database. Once the data was compiled, the educational version of the VISSIM software was used to simulate the intersection. The results were calibrated using a genetic algorithm, which was determined to be the most effective method after the comparative analysis.

*Degree Work

**Faculty of Physics and Mechanics. School of Civil Engineering. Director: Yerly Fabián Martínez Estupiñán. PhD in Transportation and Logistics Engineering.

Introducción

Los modelos permiten simular escenarios, realizar análisis, optimizar y prever los resultados e impactos con un alto grado de precisión en ambientes controlados y totalmente monitoreados, lo que ayuda a evitar discrepancias entre las proyecciones y la realidad (Dowling et al., 2004). La selección de un modelo de simulación en transporte que sea adecuado para soportar el desarrollo de cualquier proyecto de transporte es fundamental para soportar la toma de decisiones enfocadas en la gestión eficiente del tránsito en calles, así como para la priorización de infraestructuras de transporte enfocadas en optimizar y mejorar la movilidad en las ciudades.

Al realizar un modelado de transporte adecuado, es decir, siendo lo más cercano a la realidad de la movilidad presente, se pueden identificar y abordar problemas posibles antes de que ocurran, contribuyendo así a una correcta toma de decisiones, que se reflejen posteriormente en un impacto positivo en los proyectos de transporte como podría ser la reducción de la congestión vehicular, la reducción de los tiempos de viaje, planificación de rutas y dimensionamiento de infraestructura, facilitando la gestión del tráfico en el futuro.

En ese sentido, los modelos de transporte pueden ser de 3 tipos que son: según su naturaleza, según aleatoriedad y según el nivel de detalle. Según el nivel de detalle a su vez se tienen 3 diferentes escalas utilizadas para modelar y analizar los modelos de transporte, macroscópico, mesoscópico y microscópico, que se diferencian según la escala de medida a la que se quiera aplicar la simulación.

Asimismo, la confiabilidad de cualquier modelo de simulación en transporte recae en la efectividad del proceso de calibración del escenario base. Dicho proceso de refinación es un proceso iterativo, de ajuste y de reorganización a partir de datos históricos, los cuales complementan los datos reales actuales usados para construir dicho escenario inicial.

Basados en diferentes proyectos de movilidad a partir de filtros aplicados se buscó establecer diferentes parámetros para el proceso de calibración de modelos de transporte ajustado a las particularidades del área metropolitana de Bucaramanga (AMB), teniendo en cuenta que el área metropolitana actualmente no cuenta con una base de datos o información sobre los procesos de simulación y calibración usada para proyectos de infraestructura de movilidad y transporte. No contar con información clara acerca de los procesos de calibración usados al momento de evaluar la fiabilidad en los resultados de un modelo de transporte, ha conllevado a que muchas veces se usen parámetros de calibración basados en comportamientos de movilidad de otras ciudades que no reflejan el comportamiento propio de la movilidad del AMB, esto ha llevado a que esta investigación plantee la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los parámetros esenciales que deben considerarse para calibrar un modelo de simulación de transporte que tenga en cuenta la particularidades de movilidad del AMB?

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: El capítulo 2 presenta la revisión de la literatura. El capítulo 3 presenta la caracterización de la movilidad en el AMB. El capítulo 4 presenta las condiciones de movilidad del AMB. El capítulo 5 presenta la selección de metodologías aplicables para el AMB. El capítulo 6 presenta la intersección simulada y por último en el capítulo 7 se presentan las conclusiones y posteriormente las referencias bibliográficas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Establecer los parámetros esenciales en el proceso de calibración de modelos de transporte que se ajusten a las particularidades de los proyectos de movilidad y transporte del área metropolitana de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar una revisión del estado del arte sobre aspectos de calibración de modelos de simulación en transporte.
- Caracterizar las condiciones particulares de movilidad presentes en proyectos de transporte en el área metropolitana de Bucaramanga.
- Seleccionar el método de calibración y los parámetros que mejor se ajusten a las particularidades del área metropolitana de Bucaramanga para aplicar en un caso de estudio de una intersección vehicular.

2. Revisión de la literatura

En la búsqueda de información relacionada con los procesos y metodologías de calibración de modelos de simulaciones microscópicas de tráfico se utilizaron las bases de datos con las que cuenta la Universidad Industrial de Santander, como ScienceDirect y Scopus. Para tal actividad se hizo uso de palabras claves que permitieran filtrar los artículos del tema de interés, partiendo de la siguiente ecuación de búsqueda:

("CALIBRATION" AND "TRAFFIC" AND "MODEL" AND "PARAMETER" AND "METHODOLOGY" AND "MICRO" AND "SIMULATION").

Tabla 1

Resultados de búsqueda en bases de datos.

Plataforma	Publicaciones
ScienceDirect	3.007
SpringerLink	1.048
Taylor & Francis	289
SageJournals	313
ASCE	75
Scopus	18
Nature	32
Total	4.782

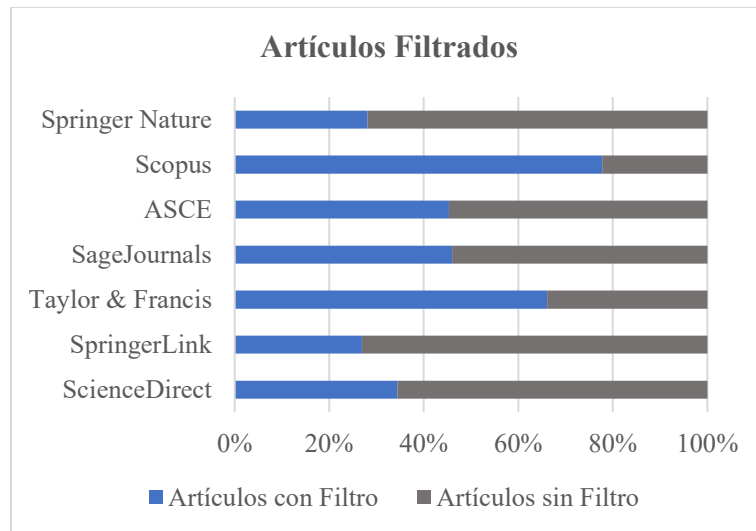
Nota. Elaboración propia.

Del mismo modo, manteniendo los términos de interés, se realizaron búsquedas en otras bases de datos como: SageJournals; Taylor & Francis; SpringerLink; Nature; Scopus; la plataforma de la ASCE (American Society of Civil Engineers).

Inicialmente entre todas las bases de datos mencionadas se encontraron 4.782 publicaciones, sin embargo, al aplicar filtros como “Engineering” logrando direccionar la búsqueda al área de la ingeniería, se obtuvieron 1,709 publicaciones. La disminución de resultados por base de datos se refleja en las proporciones mostradas en la Figura 1, las cuales corresponden a artículos, capítulos de libros, trabajos y conferencias.

Figura 1

Proporción artículos filtrados.

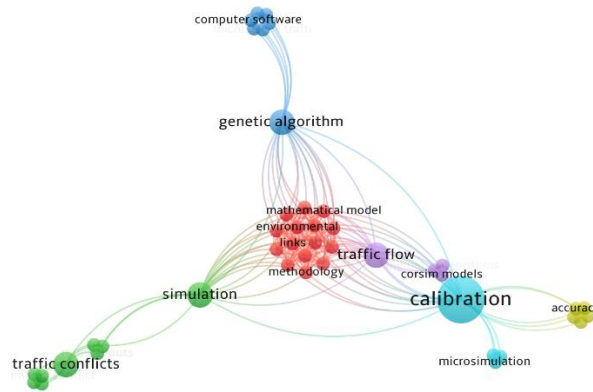


Nota. Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados de búsqueda utilizando las palabras claves y asegurándonos que el área de interés sea “Engineering” con ayuda de los filtros de búsqueda, salvo en SageJournals en donde los filtros empleados fueron “Engineering & Computing” y “Urban Studies & Planning” y de Taylor & Francis cuyo filtro fue “Engineering & Technology”, se llevó a cabo una inspección preliminar de los artículos filtrados para realizar una depuración final. En esta última revisión se excluyeron artículos cuyas temáticas principales se centraban en modelos mixtos de macro simulación, vehículos autónomos, ciclismo, el consumo energético, materiales, control de emisiones y monitoreo de ruido. La finalidad de esta depuración fue seleccionar aquellos artículos que su enfoque fueran procesos de calibración de micro simulaciones y que hayan sido realizadas en entornos urbanos similares al área metropolitana de Bucaramanga, asegurando la relevancia dentro de la selección. Finalmente, se seleccionaron 25 artículos, cuyas citas fueron importadas al gestor bibliográfico RefWorks por su sencillo uso y manejo de referencias.

Figura 2

Mapa bibliométrico de palabras claves generado con la herramienta VOSviewer.



Nota. Elaboración propia.

Se utilizó el software VOSviewer como herramienta para visualizar las palabras claves, a partir de la información bibliométrica de las publicaciones. En la Figura 2, se puede observar la conexión que hay entre keywords, en donde hay palabras como “simulation” con 22 conexiones, “calibration” con 29 conexiones, “genetic algorithm” con 24 conexiones y “traffic Flow” con 21 conexiones son de las más mencionadas entre las 57 keywords encontradas.

2.1 Categorización de artículos

A partir de la revisión de literatura se identificaron principalmente dos tipos de estudios que abarcan la temática de análisis, estos dos tipos corresponden a investigaciones totalmente teóricas y por el otro lado están las que son aplicadas.

A continuación, en la Tabla 2, se encuentran los artículos seleccionados, señalando su país, objetivo y enfoque. En el Apéndice A puede encontrarse una revisión más detallada de los artículos seleccionados.

Tabla 2

Artículos seleccionados.

ID	Nombre	País	Enfoque	Objetivo	Enfoque
----	--------	------	---------	----------	---------

1	Validation of the calibration methodology of the micro-simulation traffic model. (Otković et al., 2020)	CROACIA.	Obtener un modelo calibrado y validado de microsimulación del comportamiento de los flujos vehiculares después de hacer un paso peatonal, utilizando algoritmo genético y red neuronal.	Aplicado
2	On the Effects of Various Measures of Performance Selections on Simulation Model Calibration Performance. (Wang & Xu, 2018)	SHANGAI.	Examinar los efectos de varias selecciones de medidas de rendimiento (Measure Of Performance) MOP en el rendimiento de calibración del modelo de simulación, en términos de reflejar las condiciones reales del tráfico y las intersecciones de los vehículos.	Aplicado
3	Calibration of microscopic traffic simulation of urban road network including mini-roundabouts and unsignalized intersection using open-source simulation tool. (Yavuz & Özen, 2024)	TURQUIA.	Calibración de los parámetros del seguimiento de vehículos basado en un procedimiento de prueba y error.	Aplicado
4	A calibration procedure for increasing the accuracy of microscopic traffic simulation models. (Henclewood et al., 2017)	USA.	Presentar un procedimiento de calibración estadística, empleando un muestreo Montecarlo, definiendo intervalos y haciendo pruebas como Wilcoxon-Mann-Whitney, Kolmogorov-Smirnov, Heuristic Form Fitt para modelos de simulación de tráfico microscópico.	Teórico
5	Calibration method for microscopic traffic simulation considering lane difference. (Liu et al.)	CHINA.	Aplicar un algoritmo genético como método de calibración para simulaciones microscópicas de tráfico que tengan en cuenta las diferencias entre carriles, comparándolo con otros métodos.	Aplicado
6	Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. (Byungkyu (Brian) Park & Schneeberger, 2003)	USA.	Calibración de modelo de simulación con una señalización actuada coordinada (conjunto de semáforos que adaptan su duración según el volumen de tráfico en tiempo real).	Aplicado
7	Calibrating Traffic Microscopic Simulation Model Parameters Using an Evolutionary	BRASIL.	Calibración de parámetros que se asemejen al flujo vehicular (tiempos, velocidades, distancias) por medio de	Aplicado

	Approach. (Leal et al., 2020)		un algoritmo genético que aplicaba mutaciones gaussianas.	
8	Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. (Essa & Sayed, 2015)	CANADA.	Verificar la compatibilidad entre el tiempo, la distancia de parada, factor de reducción por seguridad de una intersección y los de la intersección contigua.	Aplicado
9	Calibration of Microsimulation Models – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Models’ Performance. (Figueiredo et al., 2014)	PORTUGAL.	Analizar cómo los errores en tiempos de reacción y distancia mínima afectan la precisión de los modelos de microsimulación.	Teórico
10	Calibration of Microscopic Traffic Flow Simulation Models considering Subsets of Links and Parameters. (Paz et al., 2020)	USA.	Proponer un programa matemático basado en optimizar y ajustar simultáneamente datos simulados y observados; implementando un algoritmo genético de solución para implementar la metodología.	Teórico y Aplicado
11	New Calibration Methodology for Microscopic Traffic Simulation Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Approach. (Jung-Beom Lee & Ozbay, 2009)	USA.	Aplicar una metodología que utiliza un muestreo bayesiano y del método SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) para mejorar la precisión de la calibración.	Teórico
12	A methodology for calibration of traffic micro-simulator for urban heterogeneous traffic operations. (Maheshwary et al., 2020)	INDIA.	Desarrollar una metodología de calibración para simulaciones microscópicas identificando parámetros sensibles por tipo de vehículo comparando tiempos de viaje.	Aplicado
13	Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. (Paz et al., 2015)	USA.	El algoritmo genético realiza la exploración del espacio de búsqueda ejecutando 2 sistemas de tráfico vehicular CORSIM diferentes dentro de la ciudad y a partir de estas identifica una zona donde podría ubicarse una posible solución global.	Aplicado

14	Enhancing parameter calibration for micro-simulation models: Investigating improvement methods. (Gao et al., 2024)	USA.	Propone 3 métodos; el primero expande la media de un solo punto a varios; el segundo, divide el sistema de parámetros en parámetros globales y locales; el tercero, se basa en el algoritmo genético. Dichos métodos mejoran la precisión e interpretabilidad del modelo de calibración.	Teórico y Aplicado
15	Effects of calibration process on the simulation of rear-end conflicts at roundabouts. (Gallelli et al., 2019)	ITALIA.	Evaluar la capacidad de la simulación para representar conflictos de tráfico de vehículos reales con fines de seguridad vial.	Aplicado
16	Microscopic Traffic Simulation Model-Based Optimization Approach for the Contraflow Lane Configuration Problem. (Qiang et al., 2008)	SINGAPUR.	Proponer una alternativa sistemática y apropiada para resolver el problema de configuración óptima, organizando y asignando algunas vías para que funcionen en contraflujo para lograr menor tiempo de viaje en los usuarios.	Teórico
17	Freeway Micro-simulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data. (Xiao-Yun Lu et al., 2014)	USA.	Calibrar modelos en Aimsun & VISSIM en una sección de autopista.	Aplicado
18	Parameter Calibration Method of Microscopic Traffic Flow Simulation Models based on Orthogonal Genetic Algorithm. (Yang et al., 2016)	CHINA.	Desarrollar un método de calibración de parámetros para modelos de simulación de tráfico empleando un algoritmo genético ortogonal (OGA) el cual mejora su rendimiento en términos de error relativo en el tiempo de viaje y la longitud de la cola en comparación con otros métodos.	Aplicado
19	Calibración del microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM en Chile. (Fernandez et al., 2014)	CHILE.	Realizar una calibración en el microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM en una arteria urbana en Santiago.	Aplicado
20	Calibration methodologies of VISSIM-based microsimulation model for heterogeneous traffic conditions - a survey. (Azam et al., 2023)	MÚLTIPLES PAISES.	Realizar una revisión a las metodologías de calibración que sean aplicadas en VISSIM y enfocadas en tráfico heterogéneo identificando enfoques y técnicas empleadas.	Teórico
21	Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models.	USA.	Proponer una solución matemática para la calibración simultánea de parámetros	Aplicado

	(Balakrishna et al., 2007)		en modelos de simulación microscópica.	
22	The principles of calibrating traffic microsimulation models. (Hollander & Liu, 2008)	MÚLTIPLES PAISES.	Identificar mediante una revisión bibliográfica global la metodología, elementos y técnicas de optimización para realizar una buena calibración de modelos de micro simulación de tráfico.	Teórico
23	Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. (Byungkyu (Brian) Park & Hongtu (Maggie) Qi, 2005)	USA.	Proponer y evaluar un procedimiento general para la calibración mediante el uso de algoritmo genético de modelos de simulación microscópica, siendo rápida, económica y son riesgos.	Teórico
24	Guidelines for Calibration of Microsimulation Models. (Dowling et al., 2004)	USA.	Encontrar el conjunto de valores de velocidades, tiempos, retrasos y colas para el modelo que mejor reproduzca las condiciones del tráfico local.	Aplicado
25	Calibration and Validation of Micro-Simulation Models Using Measurable Variables. (Tawfeek et al., 2018)	EGIPTO.	Factibilidad de utilizar variables medibles como flujos de tráfico y velocidades para la calibración y validación de modelos de simulación.	Aplicado

Nota. Elaboración propia.

En primer lugar, las investigaciones teóricas hacen referencia a aquellos trabajos donde su metodología se enfoca mayormente en una validación estadística en la cual comparan métricas de la simulación por medio de métodos cuantitativos que utilizan correlaciones y errores. Las investigaciones aplicadas muestran casos reales donde es aplicada la metodología de calibración con la finalidad de comparar la simulación con el comportamiento auténtico.

Tabla 3

Parámetros más usados investigaciones aplicadas.

Parámetro	ID Investigación
Tiempo de reacción	1, 3, 7, 9, 11, 17
Distancia promedio de parada	1, 2, 4, 5, 6, 8, 18, 20

Parte aditiva y multiplicativa de la distancia de seguridad	2, 5, 6, 14, 18, 20
Desaceleración máxima	2, 5, 7, 13, 15, 18
Espacio mínimo entre vehículos	2, 5, 6, 7, 12, 15
Velocidad deseada	7, 15, 17, 21
Tiempo de espera antes de la difusión	2, 6, 8
Número de vehículos precedentes observados	2, 6, 15
Parámetros de seguimiento (CC0, CC1, etc.)	6, 8, 12, 15, 17
Distribución de velocidad deseada	6, 17, 19
Distancia de cambio de carril	6, 8

Nota. Elaboración propia.

Dentro del proceso metodológico el siguiente paso fue identificar los parámetros que eran tenidos en cuenta para la calibración del modelo en cada uno de los estudios investigados, los cuales llegan a repetirse en múltiples ocasiones entre los diferentes artículos revisados. En la Tabla 3, se señalan los que presentan más apariciones entre los artículos que presentan estudios aplicados y en la Tabla 4, se señala para los artículos que presentan estudios teóricos.

Tabla 4

Parámetros más usados estudios teóricos.

Parámetro	ID Investigación
Distancia promedio de parada	4, 10, 14, 22
Parte aditiva y multiplicativa de la distancia de seguridad	4, 10, 14, 22
Desaceleración máxima	4, 10, 14, 16
Tiempo de reacción	9, 11, 22
Parámetros de seguimiento (CC0, CC1, etc.)	14, 20, 22
Velocidad deseada	10, 16, 22
Reglas de prioridad	20, 22, 24
Distancia de cambio de carril	4, 14, 16
Parámetros de infraestructura	22, 23, 24

Nota. Elaboración propia.

En las tablas 3 y 4 se presentan de forma más organizada cada parámetro tenido en cuenta en los artículos presentados en la tabla 2, y a partir de estos se logra identificar al frente de cada parámetro el número correspondiente al artículo que lo tiene presente en su desarrollo, mejorando la clasificación de artículos y la similitud en cuantos a los parámetros utilizados que hay entre estos.

3. Caracterización de movilidad del AMB

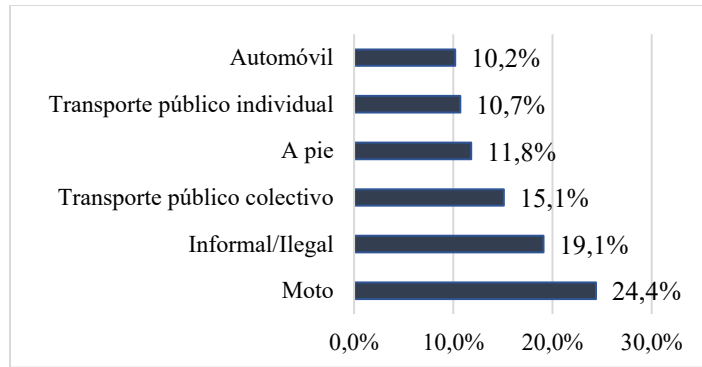
Esta investigación utiliza como caso de estudio el área metropolitana de Bucaramanga (AMB). El “Plan Maestro de Movilidad Metropolitana (PMMM) de Bucaramanga 2022-2037” y la matriz OD de viajes elaborado a partir de un proceso de expansión 3300 encuestas de hogares (EODH 2021) aplicadas en los cuatro municipios del AMB, logró caracterizar las condiciones de movilidad de los habitantes del AMB, dicha información fue el punto de partida para la caracterización de las condiciones de movilidad de la zona de estudio.

La movilidad en el AMB se caracteriza por la participación de diferentes modos de transporte, entre estos se encuentran: bus intermunicipal, moto carga, transporte escolar, transporte empresarial, bicicleta, transporte público, automóvil, caminata, informal y moto.

Con base en esta información, se identificó que el modo de transporte predominante es la moto con un 24.4% como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Modos de transporte predominantes.



Nota. Adaptado del Plan Maestro Metropolitano de Movilidad 2022-2037 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Teniendo en cuenta el diagnóstico presentado en el PMMM la demanda de movilidad de toda el AMB la lidera Bucaramanga con 469.653 viajes diarios, en segundo lugar, se encuentra Floridablanca con 219.666 viajes, en tercer lugar, está Girón con 147.562 viajes y por último se encuentra Piedecuesta con 110.417 viajes, obteniendo un total de 947.298 viajes diarios en el AMB, incluyendo todos los modos de transporte.

Por otra parte, el PMMM identificó que la hora de máxima demanda (HMD) se encuentra entre las 17:30 y 18:30 se encuentre en corredores prioritarios de transporte público, basándose en las encuestas de hogares (EODH 2021). EL PMMM destaca que los mayores picos ocurren en horas de tarde-noche, particularmente en nodos de alta afluencia, como estaciones del sistema Metrolínea y los principales corredores de conexión sur – norte y norte – sur como son la carrera 27 y la carrera 33.

Dentro de las problemáticas de movilidad identificadas en el área metropolitana se encuentran dos tipos de miradas en cuanto a estas; una mirada es la de los expertos y por otro lado la mirada de la comunidad. Las problemáticas según la mirada de los expertos están compuestas por; legal institucional, urbanismo, infraestructura, seguridad vial, transporte y social.

Por otro lado, las problemáticas según la comunidad son: falta de cultura ciudadana, acoso sexual, inseguridad, institucionalidad, infraestructura, accesibilidad, transporte informal, costo tarifa, seguridad vial, congestión, conectividad y cobertura y calidad del servicio. En consecuencia, de dichas problemáticas se evidencia en la población el poco uso del transporte público mostrando como resultado el aumento significativo de vehículos privados, llegando a un indicativo de 2 habitantes por vehículo, mostrando la preferencia por este modo de transporte reduciendo la participación del transporte colectivo, derivando esto en un mayor flujo de vehículos en el área metropolitana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Dentro de los proyectos y estrategias que el PMMM plantea para la reducción de viajes en modos motorizados, la mitigación de congestión, de contaminación y siniestrabilidad vial, incluye medidas enfocadas en estrategias que promueven la movilidad sostenible para lograr una mejora continua de la calidad de vida de la ciudadanía, siendo unas de estas la configuración de una red ciclística con un área de cobertura mayor junto con la implementación de iluminación pública orientada en la seguridad peatonal (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Estas acciones buscan fomentar una práctica amigable con el medio ambiente, inclusiva, eficiencia económica buscando con esto el equilibrio y la integración de todos los modos sostenibles como caminata, bicicleta y transporte público.

4. Condiciones de movilidad del AMB

Las principales características de la movilidad en el AMB se describen a continuación.

4.1 Tiempos de viajes

Por la duración de los desplazamientos puede existir una preferencia de una modalidad sobre otra, teniendo en cuenta que el transporte público colectivo (TPC) como modo de transporte

cubre una ruta predeterminada y que tiene que realizar múltiples paradas, no resulta tan efectivo como la Moto, que, al no contar con las limitantes del TPC en sus viajes, puede tener tiempos de viaje más cortos, esta característica y la falta de cobertura de algunos sectores ha provocado que el incremento en el uso de la motocicleta en el AMB sea considerable.

La zona con mayor variedad de tiempos de viaje es la zona central del AMB, contando con los viajes de menos de 15 minutos y comparte con Floridablanca el ser la zona donde la mayoría de sus viajes están dentro del rango de 30 minutos y una hora. Mientras que, los viajes con duración mayor a una hora se sitúan en Girón, Piedecuesta y la periferia del AMB (Jennifer Juliana Bayona Rojas, 2024).

4.2 Número de viajes

La cantidad de viajes diarios que se realizan dentro del AMB varía dependiendo del municipio de origen de los viajes. La encuesta origen destino del AMB muestra que Bucaramanga cuenta con el 49.6%, Floridablanca con 23.2%, Girón con 15.6% y Piedecuesta con 11.7% de la movilidad total.

Tabla 5

Cantidad de viajes diarios en principales modos de transporte en el AMB.

Viajes totales día				
Modo	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta
Moto	109,931	62,173	27,590	34,155
Informal	105,372	40,911	8,736	15,516
TPC	69,341	28,621	35,340	19,034
Auto	58,855	28,098	19,628	5,511
Peatonal	49,484	18,056	15,629	25,303

Nota. Adaptado del Plan Maestro Metropolitano de Movilidad 2022-2037 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

En la Tabla 5 se puede observar el número de viajes en los cinco modos de transporte principales en el AMB, los cuales abarcan el 82% de los viajes diarios, siendo la moto la de mayor número de viajes, seguido por el modo informal/ilegal el cual incluye mototaxi, bicitaxi, automóvil ilegal, servicios por aplicación como Uber, Didi, drive.

Bucaramanga es el responsable del 62% de los viajes. En cuanto a los viajes en transporte público colectivo (TPC) Girón es el segundo municipio que más viajes presenta en esta modalidad, y para los viajes peatonales que representan un 11% de los viajes totales es Piedecuesta el segundo municipio con más viajes en esta modalidad.

4.3 Horarios de viaje

Dentro del desarrollo del PMMM se muestran datos relevantes a aforos vehiculares realizados en puntos estratégicos de alta circulación, tanto para vehículos como para transporte público. Estos puntos de conteo, llamados estaciones, cubrían el horario de 5:00 a.m. a 9:00 p.m. y se denominaron estaciones maestras por registrar el flujo vehicular durante 16 horas continuas.

Tabla 6

Hora máxima demanda en estaciones maestras.

Estación Maestra	Día conteo	HMD
Vijagual	Martes	18:00 - 19:00
Av. Floridablanca /Anillo vial	Jueves	06:45 - 07:45
Avenida / Quebradaseca	Miércoles	17:30 - 18:30
Puerta del Sol	Jueves	17:15 - 18:15

Nota. Adaptado del Plan Maestro Metropolitano de Movilidad 2022-2037 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

En la Tabla 6 se presentan, a partir de los aforos realizados en el desarrollo del PMMM, los resultados del conteo en las estaciones maestras, los cuales muestran una HMD, cada una en

intervalos de tiempo diferentes, pero manteniendo una mayor agrupación en la franja de las 17:15 – 19:00 para tres de las estaciones maestras. Solo una estación registró una HMD matutina.

4.4 Propósitos

Los motivos de viaje de los habitantes en actividades como buscar/dejar a alguien representan un 5.4% de los viajes, seguido en segundo de los viajes por atención en salud en 6.7%. Siendo los que más impacto tienen en la movilidad los viajes por trabajo y el regreso a casa con un 28.7% y 43.7%, respectivamente. Lo cual, mantiene coherencia con la información recolectada en los aforos vehiculares, que es una tendencia a presentar más viajes en el horario de la tarde-noche.

4.5 Proyectos de movilidad en el AMB

En el marco del Plan Maestro de Movilidad Metropolitana (PMMM), la gestión de la movilidad en el AMB se traduce en propuestas concretas para mejorar las condiciones de transporte y desplazamiento. A pesar de que no todas las iniciativas llegan a ejecutarse, el Área Metropolitana de Bucaramanga como autoridad administrativa en transporte público metropolitano, con las alcaldías de cada municipio junto con sus secretarías de infraestructura y planeación como entidades públicas, tienen la obligación de documentar sus avances y proyectos en informes de gestión periódicos (Área Metropolitana de Bucaramanga, 2023).

Estos informes de gestión sirven como una fuente de información detallada sobre las actividades realizadas en el territorio, incluyendo los proyectos específicos que se han desarrollado. A partir de esta revisión, se identificaron y clasificaron 77 proyectos ejecutados en un periodo de 12 años entre el 2012 y el 2024 en diferentes categorías temáticas, de las cuales cuatro se relacionan directamente con la movilidad. Estas son:

- **Infraestructura vial**, para los proyectos cuyo objetivo principal es la construcción, diseño, ampliación o reparación física de vías.
- **Transporte público**, que agrupa las iniciativas enfocadas en la gestión, operación, regulación y tecnología del transporte público.
- **Movilidad sostenible**, que engloba las iniciativas que promueven modos de transporte alternativos al vehículo particular.
- **Estudio o Planeación**, cuyos proyectos tienen como resultado principal la elaboración de un documento estratégico que servirá como guía para acciones futuras.

Tabla 7

Proyectos de Infraestructura vial reportados en el AMB.

Proyecto	Año reportado	Categoría
Estructuración del Corredor Verde Carrera 33	2023	Infraestructura Vial
Intercambiador en Guatiguará	2020	Infraestructura Vial
Transversal de Malpaso	2020	Infraestructura Vial
Conexión Viaducto Provincial - El Bueno - Anillo Vial	2020	Infraestructura Vial
Conectante B1-C2 de la Vía a Pamplonita por Hectáreas	2020	Infraestructura Vial
Estudios y Diseños Fase II - Circunvalar de Guatiguará	2018	Infraestructura Vial
Estudios y Diseños Fase III - Circunvalar de Guatiguará	2018	Infraestructura Vial
Alianza Público Privada El Bueno - Anillo Vial	2018	Infraestructura Vial
Conexión Puente Provincial - El Bueno - Anillo Vial de Río Frío	2017	Infraestructura Vial
Intercambiador de Mensulí	2012-2015	Infraestructura Vial
Construcción de la Transversal del Bosque	2012-2015	Infraestructura Vial

Conexión Alterna Centro Ciudadano - Pasando por San Miguel	2012-2015	Infraestructura Vial
Construcción de la Transversal del Bosque Tramo I	2012-2015	Infraestructura Vial
Rehabilitación y mantenimiento de la malla vial urbana con asfalto natural en frío-MAPIA en las comunas 1,2,3,4,5,6,7 y 8 del municipio de Floridablanca	2013	Infraestructura Vial
Rehabilitación y mantenimiento de ejes viales comunas y casco antiguo del municipio del municipio de Floridablanca.	2013	Infraestructura Vial
Reposición de redes de servicios públicos y pavimentación de las vías intervenidas en los barrios Santana y Villabel, Santander	2014	Infraestructura Vial
Reposición de redes de servicios públicos y pavimentación de las vías intervenidas en los barrios La Cumbre, Caldas y Zapamanga	2014	Infraestructura Vial
Rehabilitación y mantenimiento de ejes viales comunas y casco antiguo del municipio de Floridablanca.	2014	Infraestructura Vial
Rehabilitación y mantenimiento de ejes viales comunas y casco antiguo del municipio de Floridablanca.	2015	Infraestructura Vial
Construcción de obras varias de estabilización y protección en las vías de los sectores El Reposo	2016	Infraestructura Vial
Mantenimiento, adecuación y rehabilitación de la malla vial del municipio de Floridablanca.	2016	Infraestructura Vial
Reposición redes de servicios públicos y pavimentación de la malla vial en la carrera 36 entre calle 111 y 112 y calle 111A entre carreras 35 y 36 del barrio Caldas	2016	Infraestructura Vial
Construcción intercambiador de Fátima ubicado en el sector de la intersección de la Transversal Oriental con la vía Altoviento-Santafé y San Bernardo	2017	Infraestructura Vial

Ampliación y optimización del intercambiador vial ubicado en el sector de Papi Quiero Piña	2017	Infraestructura Vial
Mantenimiento Y Mejoramiento Con Maquinaria De Las Vías Terciarias Del Municipio De Girón Santander	2024	Infraestructura Vial
Construcción Del Puente Nariño Sobre El Rio De Oro En La Jurisdicción De Los Municipios De Bucaramanga Y Girón	2024	Infraestructura Vial
Estudios Diseños Y Obras De Construcción, Rehabilitación, Mejoramiento Y Mantenimiento De Tramos Viales de Girón.	2017	Infraestructura Vial

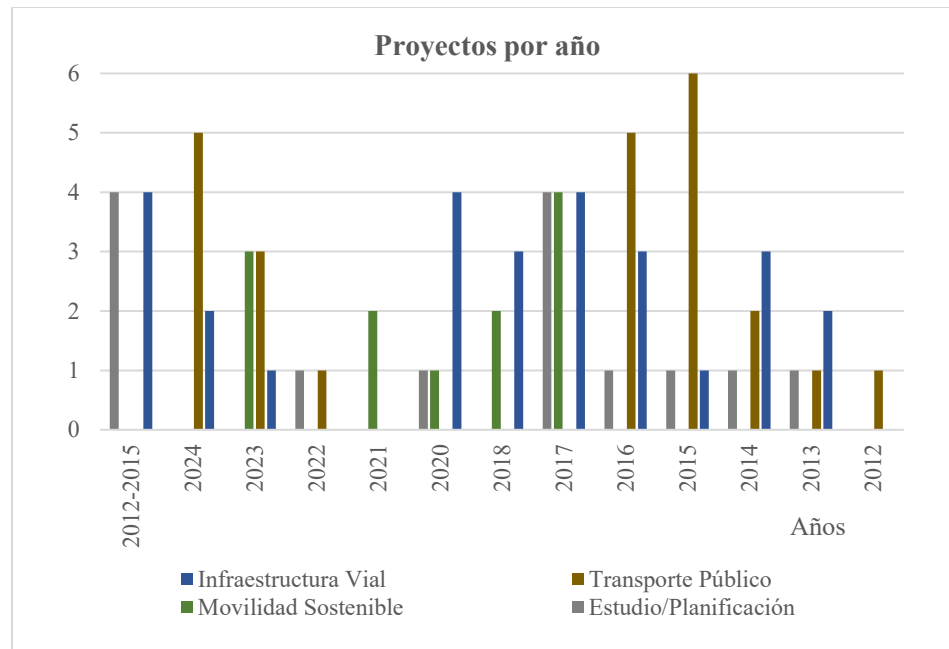
Nota. Adaptado de las páginas de las alcaldías de los municipios pertenecientes el AMB

(Área Metropolitana de Bucaramanga, 2023).

La revisión sobre los proyectos reportados en los informes de gestión que se pueden categorizar dentro de la infraestructura vial se presenta en la Tabla 7, donde se han tabulado un total de 27 proyectos.

Figura 4

Cantidad de proyectos realizados por año de actividad.



Nota. Adaptado de las páginas de las alcaldías de los municipios pertenecientes el AMB (Área Metropolitana de Bucaramanga, 2023).

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 4, se presenta la distribución de proyectos por año y por tipo en el AMB de los 77 proyectos que fueron encontrados dentro del periodo de revisión (2012 – 2024). Esta distribución incluye 12 proyectos para la categoría de Movilidad sostenible, 14 para Estudio o Planeación y 24 para Transporte público. Como se observa en la Tabla 7 presentada la mayoría de proyectos están enfocados en infraestructura vial aportando un 35.06% del total investigados; no todos los proyectos cuentan con información sobre el estado de ejecución que presentan actualmente, es decir, si ya fueron ejecutados o si están siendo ejecutados actualmente, por ende es evidente esta limitación a la información pública de dichos proyectos, haciendo complejo evaluar el impacto que generan en la movilidad del AMB desde las diferentes categorías propuestas, de manera similar, se observa que es difícil encontrar indicadores que estén directamente relacionados con el mejoramiento de tiempos de viaje, niveles de servicio o que se aborden cuestiones sobre procesos de calibración.

No obstante, al reconocer que dentro de los proyectos de movilidad que se presentan en el AMB se muestra una tendencia hacia aquellos proyectos cuya finalidad era la ampliación de número de carriles, diseño y construcción de nuevas vías, demuestra la importancia que se le otorga al mejoramiento de la red física y a la movilidad basada en infraestructura para los vehículos automotores, lo que significa que la información de valor sobre el reconocimiento de elementos para el modelado adecuado de simulaciones en transporte debería ser un factor muy relevante con alto impacto para futuras propuestas que puedan desarrollarse dentro del AMB y para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales.

5. Selección de metodologías aplicables al AMB.

Luego de caracterizar las condiciones actuales de movilidad en el AMB e identificar los principales proyectos de infraestructura de transporte que se han ejecutado en los últimos años, se buscó establecer un criterio más adecuado para seleccionar de los estudios previamente clasificados en la revisión de literatura, los que presenten una mayor similitud con las particularidades de movilidad del AMB esto con el fin de que haya una menor discrepancia al momento de seguir la metodología que describan y los resultados esperados de su aplicación. Por lo tanto, puede llegar a ser más compleja la valoración final si se basa en proyectos con condiciones de movilidad diferentes a las del AMB, los resultados van a tener un mayor error y el proyecto a su vez se iría alejando de las condiciones reales de movilidad que presenta el AMB y su análisis desde una herramienta de simulación no tendría sentido ya que no podría evaluarse su impacto ante las condiciones particulares del AMB.

Por lo tanto, se decidió realizar una evaluación para los estudios seleccionados por un método de suma ponderada (SAW) simplificado, sabiendo que dentro de los métodos de decisión

multicriterio (MCDM) en el método SAW se establece el valor de los elementos por medio de una simple suma de puntuaciones que representan el cumplimiento de criterios, multiplicadas por las ponderaciones particulares (Velasquez & Hester, 2013), lo que permite calificar bajo una escala común cinco aspectos considerados relevantes debido a que son bastante recurrentes y los más asociados en el análisis de modelos de transporte, en este caso enfocados en el AMB, asignando el mismo peso a cada criterio con una puntuación en una escala de cero a dos.

A continuación, se explican cada uno de los aspectos definidos

5.1 Tráfico heterogéneo

Se considera relevante reconocer el tipo de tráfico empleado en la calibración, ya que modelar un tráfico con modos de viaje poco variados puede simplificar el proceso, en contraste con la matriz modal del AMB. Por esta razón, se realizó una valoración de menor a mayor: el valor cero (0) se asignó a los estudios que trabajan con tráfico homogéneo o que no mencionan la composición vehicular; el valor uno (1) se otorgó a aquellos que hacen referencia a los modos de transporte presentes en la realidad, aunque sin dejar claro si fueron considerados en la simulación; y el valor dos (2) se reservó para los estudios que incluyen distintos modos de transporte en su modelación.

5.2 Manejo de datos reales

Este aspecto busca asegurar que se utilice información que refleje el comportamiento real de la movilidad en el punto donde se realizó la calibración. La valoración fue la siguiente: el valor cero (0) se asignó a los estudios que emplean valores genéricos en los volúmenes de tránsito; el valor uno (1) corresponde a aquellos que utilizan información de tráfico real; y el valor dos (2) se otorgó a los estudios que, además de modelar con datos reales, emplean indicadores estadísticos

como el error cuadrado medio o el error de porcentaje medio absoluto para llevar a cabo la calibración.

5.3 Contexto urbano

Con el fin de mantener los casos simulados lo más cercanos posible al contexto del presente trabajo, se consideró relevante que la calibración se realizara en una intersección. Así, el valor cero (0) se asignó a los estudios enfocados exclusivamente en autopistas; el valor uno (1) se otorgó a aquellos que, aunque no se centran en intersecciones, presentan elementos rescatables; y el valor dos (2) se reservó para los estudios con un enfoque claro en intersecciones urbanas.

5.4 Explicación de metodología

Dado que la descripción del procedimiento es fundamental para comprender los pasos seguidos en la calibración, este aspecto se evaluó de la siguiente manera: el valor cero (0) se asignó a los estudios que no dedican un espacio específico a la metodología; el valor uno (1) corresponde a aquellos que ofrecen una explicación general sin profundizar; y el valor dos (2) se otorgó a los estudios que presentan una descripción detallada de la metodología aplicada.

5.5 Uso de parámetros

También se consideró el uso de indicadores estadísticos en la evaluación de los estudios. El valor cero (0) se asignó a los casos en los que no se emplean indicadores; el valor uno (1) corresponde a los estudios que utilizan parámetros e indicadores sin mencionar su calibración; y el valor dos (2) se otorgó a aquellos que emplean indicadores y parámetros calibrados.

5.6 Resultado selección para AMB

Una vez realizada la evaluación, se pueden visualizar los resultados en cada uno de los cinco aspectos en la Tabla 8. En el Apéndice B puede encontrarse con la justificación para cada una de las puntuaciones.

Tabla 8

Calificaciones estudios según criterio para AMB.

ID	Nombre del artículo	Tráfico heterogéneo	Uso datos reales	Contexto urbano	Metodología	Uso parámetros
1	Validation of the calibration methodology of the micro-simulation traffic model	1	1	1	2	1
2	On the Effects of Various Measures of Performance Selections on Simulation Model Calibration Performance.	1	2	2	2	2
3	Calibration of microscopic traffic simulation of urban road network including mini-roundabouts and unsignalized intersection using open-source simulation tool.	2	2	2	2	2
4	A calibration procedure for increasing the accuracy of microscopic traffic simulation models.	1	1	1	2	1
5	Calibration method for microscopic traffic simulation considering lane difference.	1	2	1	2	2
6	Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System.	1	2	1	2	2
7	Calibrating Traffic Microscopic Simulation Model Parameters Using an Evolutionary Approach.	1	2	2	2	2
8	Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts.	1	2	2	2	2

9	Calibration of Microsimulation Models – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Models’ Performance.	1	1	2	1	1
10	Calibration of Microscopic Traffic Flow Simulation Models considering Subsets of Links and Parameters.	1	2	1	2	2
11	New Calibration Methodology for Microscopic Traffic Simulation Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Approach.	1	2	1	2	2
12	A methodology for calibration of traffic micro-simulator for urban heterogeneous traffic operations.	2	2	1	2	2
13	Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm.	1	2	2	2	1
14	Enhancing parameter calibration for micro-simulation models: Investigating improvement methods.	1	1	2	1	2
15	Effects of calibration process on the simulation of rear-end conflicts at roundabouts.	1	2	1	1	2
16	Microscopic Traffic Simulation Model-Based Optimization Approach for the Contraflow Lane Configuration Problem.	1	1	0	2	1
17	Freeway Micro-simulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data.	1	2	1	2	2
18	Parameter Calibration Method of Microscopic Traffic Flow Simulation Models based on Orthogonal Genetic Algorithm.	1	2	2	2	2

19	Calibración del microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM en Chile	1	2	1	2	2
20	Calibration methodologies of VISSIM-based microsimulation model for heterogeneous traffic conditions - a survey.	2	0	1	2	2
21	Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models.	1	2	1	1	2
22	The principles of calibrating traffic microsimulation models.	1	0	1	2	2
23	Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models	1	2	1	2	2
24	Guidelines for Calibration of Microsimulation Models	1	2	1	2	2
25	Calibration and Validation of Micro-Simulation Models Using Measurable Variables	2	2	0	2	2

Nota. Elaboración propia.

Posterior a la calificación de cada estudio, tomando el método de decisión multicriterio SAW simplificado, se sumaron los puntajes obtenidos en los cinco criterios descritos, cada criterio cuenta con el mismo valor para así poder elegir la metodología más “completa” dentro todos los aspectos, evitando que una metodología con una puntuación alta en un criterio de mayor peso y baja en los demás sea beneficiada. Por esto, a partir de la sumatoria total se definieron tres rangos de calificación: si la suma total era menor o igual a seis (6), se considera puntuación baja, si la suma total era mayor a seis (6) y menor o igual a ocho (8), es una calificación media; y si la suma total era mayor o igual a nueve (9), se considera una calificación alta, lo que significa que tiene una afinidad con las condiciones del AMB.

Se identificaron seis (6) investigaciones con calificaciones altas, mostradas en la Tabla 9, que se consideran las metodologías más afines con las condiciones de movilidad presentadas en el AMB.

Tabla 9

Metodologías seleccionadas como afines para el AMB.

ID	Nombre	País Enfoque
2	On the Effects of Various Measures of Performance Selections on Simulation Model Calibration Performance.	CHINA.
3	Calibration of microscopic traffic simulation of urban road network including mini-roundabouts and unsignalized intersection using open-source simulation tool.	TURQUIA.
7	Calibrating Traffic Microscopic Simulation Model Parameters Using an Evolutionary Approach.	BRASIL.
8	Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts.	CANADA.
12	A methodology for calibration of traffic micro-simulator for urban heterogeneous traffic operations.	INDIA.
18	Parameter Calibration Method of Microscopic Traffic Flow Simulation Models based on Orthogonal Genetic Algorithm.	CHINA.

Nota. Elaboración propia.

5.7 Métricas de calibración en metodologías escogidas

A partir de la revisión en las metodologías seleccionadas se identificaron las medidas adecuadas para la calibración de los modelos de simulación. Una vez postulados los parámetros a emplear en el análisis se empieza a buscar una intersección que presente similitud en los datos de campo aforados debido a que el AMB no presenta aforos actualizados disponibles al público en

general y que a su vez dicha intersección fuera representativa en la movilidad del AMB. Entre estas métricas están los tiempos de viaje, longitud de colas, distribución de distancia entre vehículos, volúmenes de tránsito, velocidades, tiempo de retraso y tiempo hasta colisión.

6. Intersección simulada

Tras la revisión de las metodologías de calibración y de definir aquellas más afines a las condiciones del AMB, el siguiente paso consistió en replicar una de estas metodologías para el proceso de calibración de un proyecto de simulación de transporte en el AMB. Por lo tanto, se procedió a seleccionar una intersección vial en la ciudad de Bucaramanga que contara con información de tráfico y que fuera representativa de la movilidad del AMB.

Para el modelado de la intersección se eligió el cruce de la carrera 27 con la calle 56 en Bucaramanga, como se aprecia en la Figura 5, es una intersección que permite la conexión norte – sur del flujo vehicular con dirección a Girón y Floridablanca, junto con el tráfico que circula en ambos sentidos de la calle 56 que corresponde a un eje vial de conexión oriente – occidente en la ciudad de Bucaramanga, siendo un punto casi de paso obligatorio para todos los vehículos del AMB.

Figura 5

Zona de intersección elegida.



Nota. Adaptado de Google Earth.

La intersección tiene forma de cruz y la prioridad de los movimientos vehiculares es controlada por un sistema de semáforos, en las calles la vía cuenta con dos carriles por sentido, mientras que en las carreras cuenta con tres carriles por sentido, a excepción del tramo con sentido sur-norte de la carrera 27 que cuenta con cuatro carriles antes de llegar a la intersección semaforizada.

Figura 6

Intersección Carrera 27 – Calle 56, Bucaramanga.



Nota. Adaptado de Google Earth.

6.1 Modelado intersección

El modelado de la intersección se realizó utilizando la versión académica del software de modelado microscópico PTV Vissim. Esta licencia presenta ciertas limitaciones, como un tiempo máximo de simulación de 600 segundos, la inaccesibilidad a la interfaz COM (Component Object Model). La interfaz COM permite el control del software y la automatización de tareas mediante scripts o aplicaciones externas, incluyendo el acceso a todos los atributos de los objetos en la red y la integración de algoritmos de control definidos (PTV Planung Transport Verkehr AG, 2022).

Para el modelado, se recrearon los tramos que conforman la intersección, asignándole el número de carriles y las conexiones correspondientes, luego de esto se definieron las rutas que los vehículos pueden tomar y se asignaron los grupos de señales del sistema de semaforización. La información sobre los flujos vehiculares corresponde a un aforo realizado previamente por el grupo de investigación Geomática, de este aforo se obtuvieron volúmenes por tramo, el volumen para cada movimiento y la composición vehicular.

Figura 7

Intersección modelada en Vissim



Nota. Elaboración propia.

Se añadieron reducciones de velocidad en los giros a la derecha se colocaron recolectores de información en la zona de los semáforos para contar el número de vehículos que pasan por la intersección durante la simulación.

6.2 Elección metodología para la intersección

Para seleccionar la metodología más adecuada se realizó una evaluación basada en tres criterios clave: el software de modelado, la aplicación de algoritmos y la posibilidad de recreación. Se asignó una puntuación de uno (1) a dos (2) a cada aspecto. Con el objetivo de identificar la metodología más afín a las condiciones del AMB considerando los datos disponibles y las limitaciones de la licencia de Vissim. A continuación, se explican cada uno de los aspectos definidos.

- **Software de modelado empleado.** Es un aspecto para tener en cuenta puesto que en caso de no usarse el mismo programa en el otro simulador se puede contar con herramientas o funciones diferentes, haciendo más difícil la recreación de la metodología. El valor uno (1) se otorgó cuando no se utilizaba el mismo programa y el de dos (2) cuando el programa era Vissim.

- **Aplicación de algoritmos.** Con esto se quiere destacar las metodologías que emplean algún tipo de algoritmo para llegar a la mejor configuración de sus parámetros en la simulación. El valor uno (1) corresponde a que no se emplea un algoritmo, y el de dos (2) cuando sí era utilizado.

- **Es posible recrear.** Teniendo en cuenta que las metodologías no son realizadas en licencias con limitaciones, estas pueden llegar a tener una extensa secuencia de pasos que al no contarse con la misma licencia puede ser más difícil de replicar. El valor uno (1) se otorgó cuando la metodología realizaba una gran cantidad de pasos y el de dos (2) cuando el proceso se puede considerar que cuenta con pocos pasos.

En la Tabla 10 se pueden visualizar las calificaciones para cada una de las metodologías seleccionadas, se puede evidenciar que al hacer la suma total de las calificaciones el estudio con la puntuación más alta corresponde a la investigación de ID 12 (Maheshwary et al., 2020), siendo esta la metodología que se va a aplicar en la calibración de la intersección en Vissim.

Tabla 10

Calificación metodologías según criterio para intersección modelada.

ID Investigación	Programa Utilizado		Uso Algoritmo		Es recreable		Total
	Valor	Motivo	Valor	Motivo	Valor	Motivo	
2	2	Utiliza VISSIM	2	Utiliza AG	1	Automatiza el proceso con múltiples métricas	5
3	1	Utiliza SUMO	1	Hace modificaciones manualmente	2	Se pueden hacer las modificaciones de los valores manualmente	4
7	1	Utiliza AIMSUN	2	Utiliza AG	2	Automatiza el proceso con una sola métrica	5

8	2	Utiliza VISSIM	2	Utiliza AG	1	Automatiza el proceso haciendo calibraciones en dos puntos	5
12	2	Utiliza VISSIM	2	Utiliza AG	2	Automatiza el proceso con una sola métrica	6
18	2	Utiliza VISSIM	2	Utiliza AG	1	Automatiza el proceso para tres tipos de calibraciones diferentes	5

Nota. Elaboración propia.

6.3 Descripción metodología aplicada

La metodología aplicada comienza con la selección de los diez parámetros de seguimiento del modelo Wiedemann 99, estos parámetros se repitieron para cada tipo de vehículo: auto, moto, bus y camión (Maheshwary et al., 2020). Los buses y camiones se agruparon por su bajo porcentaje de participación en el flujo vehicular. Entonces, los parámetros son descritos de la siguiente forma:

Tabla 11

Descripción de parámetros modificados en el software Vissim.

Parámetro	Descripción
cc0	Distancia de parada deseada entre dos vehículos.
cc1	Tiempo que quiere mantener un conductor entre su vehículo y el que le precede
cc2	Máxima distancia adicional más allá de la distancia de seguridad deseada aceptada por un conductor que sigue a otro vehículo antes de acercarse intencionadamente.
cc3	Tiempo en segundos antes de alcanzar el límite superior de la distancia de seguimiento a un vehículo más lento al inicio del proceso de deceleración.
cc4	Umbral para la velocidad relativa en comparación con un vehículo de cabeza más lento durante el proceso de seguimiento.
cc5	Umbral para la velocidad relativa en comparación con un vehículo de cabeza más rápido durante el proceso siguiente.
cc6	Influencia de la distancia en los umbrales de velocidad relativa durante el proceso de seguimiento.

cc7	Aceleración/deceleración mínima durante el proceso de seguimiento oscilante.
cc8	Aceleración al arrancar desde parado.
cc9	Aceleración deseada a 80 km/h

Nota. Adaptado de PTV Vissim 2025

Con un total de 30 parámetros, se definieron los rangos de valores para cada uno, la técnica de muestreo de hipercubo latino (LHS) es un procedimiento de muestreo aleatorio estratificado que suministra muestras para las variables de manera eficiente a partir de sus distribuciones (Maheshwary et al., 2020), esta técnica se utilizó para generar una serie uniforme de valores en las simulaciones propuestas. Después de ejecutadas las simulaciones, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar los parámetros que tenían un impacto más significativo en los resultados del modelo. Sobre los parámetros que se identificaron como significativos se aplicó un algoritmo genético con el objetivo de encontrar la mejor configuración de parámetros que minimizara el error absoluto porcentual entre los conteos vehiculares simulados y los reales, con la meta de alcanzar un error absoluto porcentual menor al 5%. El proceso se limitó a un máximo de 50 generaciones o hasta que se lograra convergencia. El error absoluto porcentual se calculó usando la siguiente fórmula:

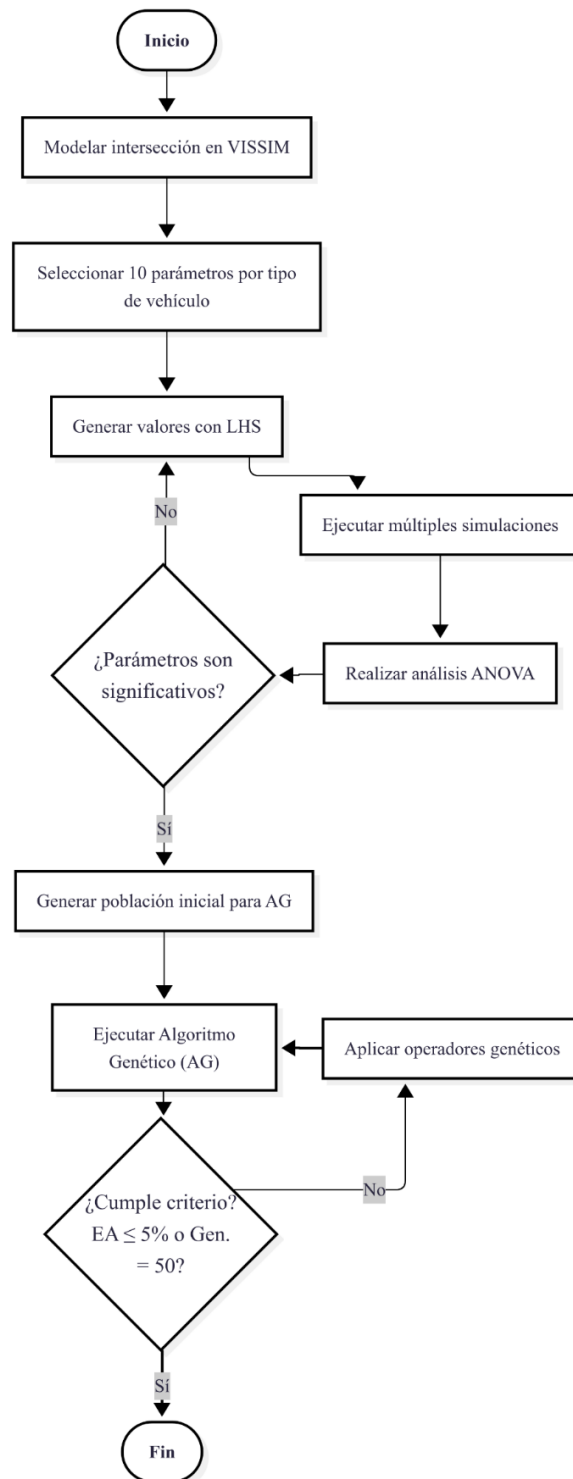
$$\%EA = \frac{|V_{obs} - V_{sim}|}{V_{obs}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Para automatizar la modificación de los parámetros, realizar las simulaciones y la exportación de los valores, se utilizó AutoHotkey (AHK), un lenguaje de scripting de código abierto para Windows de sintaxis flexible, empleado para realizar tareas de autoclick y macros como alternativa a la interfaz COM, que no estaba disponible en la licencia estudiantil de Vissim. En el Apéndice C se encuentran los scripts de AHK utilizados para la automatización de la entrada de datos y ejecución de simulaciones dentro del programa. También se emplearon scripts en

Python para la aplicación de la prueba ANOVA y el algoritmo genético, los scripts de Python se encuentran en el Apéndice D. El diagrama de flujo de la metodología aplicada se presenta en la Figura 8.

Figura 8

Diagrama de flujo metodología aplicada



Nota. Elaboración propia.

6.4 Resultados calibración

Después de ejecutar las múltiples simulaciones para la prueba ANOVA, se identificaron seis parámetros como significativos en los resultados del modelo. Se consideraron significativos aquellos con un p-value inferior a 0.1.

Tabla 12

Resultados más altos prueba ANOVA

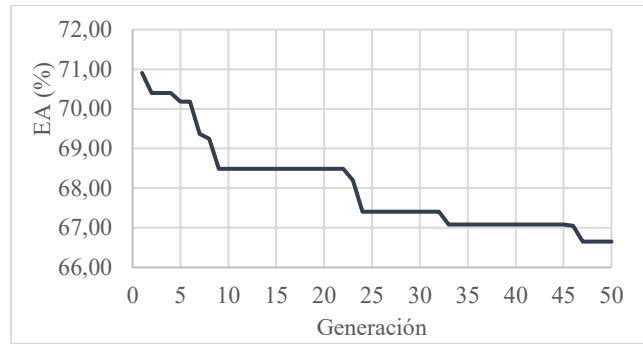
Parámetro	p-value	Significativo
cc1auto	0.0000	Sí
cc1moto	0.0000	Sí
cc0auto	0.0016	Sí
cc8auto	0.0348	Sí
cc0moto	0.0692	Sí
cc2moto	0.0934	Sí
cc1bc	0.1018	No
cc9bc	0.1038	No
cc4auto	0.1277	No
cc3moto	0.1451	No

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se aplicó el algoritmo genético con la población inicial generada con los parámetros seleccionados. Después de 50 generaciones, no se logró alcanzar el objetivo de un error absoluto porcentual inferior al 5%, el valor mínimo obtenido fue de 66.65%. El resultado se puede atribuir a que, debido a la configuración del algoritmo genético, los valores propuestos en cada generación de simulación presentasen una baja variación entre sí, dando como consecuencia una exploración de soluciones limitada, llevando a una convergencia prematura, sin encontrar una mejor selección de valores después de múltiples generaciones. De forma adicional, se considera la posibilidad de que el error no fuese reducido debido a la existencia de algún parámetro adicional significativo que no fuese considerado dentro de la metodología implementada.

Figura 9

Gráfico de progresión del error absoluto porcentual durante la aplicación del algoritmo genético.



Nota. Elaboración propia.

La mejor configuración de parámetros fue alcanzada en la generación 46, en la Tabla 13 se muestran estos valores.

Tabla 13

Mejor configuración de parámetros encontrada.

Parámetro	Valor
cc0moto	5.91
cc1moto	20
cc2moto	1.53
cc0auto	2.14
cc1auto	1.50
cc8auto	1.64

Nota. Elaboración propia.

Donde los valores corresponden a una distancia de parada deseada entre dos vehículos para motos y autos de 5.91 y 2.14 metros, respectivamente. Un tiempo que un conductor quiere mantener entre su vehículo y el que le precede para motos y autos de 20 y 1.5 segundos, respectivamente. Una máxima distancia adicional más allá de la distancia de seguridad deseada aceptada por un conductor que sigue a otro vehículo antes de acercarse intencionadamente para motos de 1.53 metros y una aceleración desde parada en autos de 1.64 m/s².

7. Conclusiones

En este trabajo de investigación, se buscó, a partir de la revisión de literatura, en primer lugar identificar una metodología de calibración para simulaciones en proyectos de transporte y de movilidad que se ajustara de forma adecuada a las particularidades de movilidad que presenta el área metropolitana de Bucaramanga; para esto, se realizó una revisión de información global, sobre artículos enfocados en procesos de calibración, y de esta forma se identificaron los parámetros que definían de mejor manera un proceso de calibración ajustado a las condiciones de movilidad en el AMB.

A partir del proceso de filtrado aplicado a la revisión de literatura, se seleccionaron los artículos con más afinidad a las condiciones de movilidad presentes en el AMB, sujetos a la información pública recopilada. Dado que en el AMB no es posible encontrar una gran cantidad de información significativa y reciente acerca de procesos de simulación en proyectos de transporte y movilidad, la búsqueda de proyectos se realizó desde un rango aproximadamente de 15 años atrás para lograr ser más exactos en los parámetros a definir y que en realidad reflejaran las condiciones reales de movilidad del AMB.

Los parámetros encontrados, a partir de la revisión de literatura y la revisión de información pública, para realizar la calibración de modelos microscópicos de transporte para el AMB son los parámetros de modelos de seguimiento como Wiedemann 74, Wiedemann 99, Krauss y parámetros individuales como desaceleración máxima, tiempo de reacción, tiempo de reacción en parada, tiempo de reacción en semáforo, velocidad máxima deseada de vehículos, aceptación de velocidad de los vehículos, distancia mínima entre vehículos; entre los parámetros modificados en el software de la simulación VISSIM (con licencia estudiantil) se encuentran los parámetros del modelo de seguimiento de automóviles de Wiedemann 99. El reto llevado a cabo

fue encontrar e implementar el método más apropiado al AMB, teniendo en cuenta la escasez de artículos relevantes en Colombia y países cercanos.

El reconocer que dentro de los proyectos de movilidad que se presentaron en el AMB se muestra una tendencia hacia aquellos proyectos cuya finalidad es la ampliación de número de carriles, diseño y construcción de nuevas vías, demuestra la importancia que se le otorga al mejoramiento de la red física y a la movilidad basada en infraestructura para los vehículos automotores, lo que significa que la información de valor sobre el reconocimiento de elementos para el modelado adecuado de simulaciones en transporte debería ser un factor muy relevante con alto impacto para futuras propuestas que puedan desarrollarse dentro del AMB y para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales.

En los resultados del caso de estudio simulado se observó que, a pesar de la calibración aplicada, se obtuvo un error absoluto porcentual de más del 60%, lo cual es significativamente alto, ya que el valor de error esperado debería ser inferior al 5%. Una posible causa que se puede atribuir a este resultado es una limitada capacidad exploratoria en las variaciones de los valores paramétricos del algoritmo genético, provocando una limitación en la exploración del espacio de soluciones, lo que pudo conducir a una convergencia prematura, sin encontrar una mejor selección de valores después de múltiples generaciones. Otra posible causa que pudo haber interferido en este porcentaje de error tan alto es la proyección realizada a los aforos del año 2008 que fueron los suministrados y utilizados para la intersección definida; teniendo en cuenta que para la proyección se tuvo en cuenta bases de datos de los municipios pertenecientes al AMB, presentando diferencias considerables de tráfico a la intersección propuesta.

Por otra parte, se deben considerar las limitaciones de la licencia gratuita del software, por contar con un espacio reducido de modelado y tiempos cortos de simulación donde cada modificación paramétrica no llegue a tener el impacto deseado.

A partir del trabajo realizado, se recomienda establecer que para cualquier análisis de modelación presentado a autoridades de tránsito se deba exigir su respectiva revisión y validación por parte de profesionales en el tema, asegurando la fiabilidad de las técnicas de las simulaciones. Además, se considera crucial contar con un procedimiento de calibración de modelos estandarizado, por lo que también se recomienda que las oficinas de planeación y tránsito prioricen contar con herramientas de simulación y personal capacitado para utilizarlas.

8. Recomendaciones

Recomendamos en el proceso de modelado, para la representación de un escenario de máxima demanda para una intersección existente, tener en cuenta la extensión que llega a cubrir la red al colapsar en la realidad, asegurando que la versión de software utilizado no presente limitaciones de alcance.

Para la ejecución del análisis de varianza (ANOVA), es importante verificar que los parámetros a evaluar presenten una variación lineal dentro del software. La selección de parámetros por listas desplegables con secuencias numéricas irregulares, en lugar del ingreso directo del valor, puede afectar la linealidad de los datos y ocasionar imprecisiones en los resultados del análisis.

Con el propósito de incrementar la capacidad exploratoria del algoritmo, buscando abarcar un mayor espacio de soluciones y evitando una convergencia prematura, se recomienda, para la

configuración del algoritmo genético, evaluar cuidadosamente la técnica de selección y utilizar una tasa de mutación moderada.

Referencias Bibliográficas

- Área Metropolitana de Bucaramanga. (2023). *Informes de Gestión*. Recuperado de <https://www.amb.gov.co/informes-de-gestion/>
- Azam, M., Hassan, S., & Che Puan, O. (2023). Calibration methodologies of VISSIM-based microsimulation model for heterogeneous traffic conditions - a survey. *Advances in Transportation Studies*, 59, 123–146.
- Balakrishna, R., Antoniou, C., Moshe Ben-Akiva, Koutsopoulos, H. N., & Wen, Y. (2007). Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record*, 1999(1), 198–207. 10.3141/1999-21
- Byungkyu (Brian) Park, & Hongtu (Maggie) Qi. (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. *Transportation Research Record*, 1934(1), 208–217. 10.1177/0361198105193400122
- Byungkyu (Brian) Park, & Schneeberger, J. D. (2003). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Record*, 1856(1), 185–192. 10.3141/1856-20

- Dowling, R., Skabardonis, A., Halkias, J., McHale, G., & Zammit, G. (2004). Guidelines for Calibration of Microsimulation Models: Framework and Applications. *Transportation Research Record*, 1876(1), 1–9. 10.3141/1876-01
- Essa, M., & Sayed, T. (2015). Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. *Accident Analysis & Prevention*, 84, 41–53. 10.1016/j.aap.2015.08.005
- Fernandez, R., Titular, P., Andes, L., Chile, A., & Valencia, A. (2014). *Calibración del microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM en Chile*
- Figueiredo, M., Seco, Á, & Silva, A. B. (2014). Calibration of Microsimulation Models – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Models’ Performance. *Transportation Research Procedia*, 3, 962–971. 10.1016/j.trpro.2014.10.076
- Gallelli, V., Guido, G., Vitale, A., & Vaiana, R. (2019). Effects of calibration process on the simulation of rear-end conflicts at roundabouts. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(2), 175–184. 10.1016/j.jtte.2018.03.006
- Gao, Y., Zhou, C., Rong, J., Zhang, X., & Wang, Y. (2024). Enhancing parameter calibration for micro-simulation models: Investigating improvement methods. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 134, 102950. 10.1016/j.simpat.2024.102950
- Henclewood, D., Suh, W., Michael, O. R., Fujimoto, R., & Michael, P. H. (2017). A calibration procedure for increasing the accuracy of microscopic traffic simulation models. *Simulation*, 93(1), 35–47. 10.1177/0037549716673723

Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models.

Transportation, 35(3), 347–362. 10.1007/s11116-007-9156-2

Jennifer Juliana Bayona Rojas. (2024). *Análisis del impacto del nivel socioeconómico en los patrones de movilidad de los habitantes del área metropolitana de Bucaramanga* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Jung-Beom Lee, & Ozbay, K. (2009). New Calibration Methodology for Microscopic Traffic Simulation Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Approach. *Transportation Research Record*, 2124(1), 233–240. 10.3141/2124-23

Leal, S. S., Maciel de Almeida, P. E., & Ribeiro, R. G. (2020). Calibrating Traffic Microscopic Simulation Model Parameters Using an Evolutionary Approach. *Transportation Research Procedia*, 48, 1038–1045. 10.1016/j.trpro.2020.08.131

Liu, H., Deng, H., Li, J., Yang, S., Dong, K., & Zhao, Y. Calibration method for microscopic traffic simulation considering lane difference. *Simulation*, , 00375497241268740. 10.1177/00375497241268740

Maheshwary, P., Bhattacharyya, K., Maitra, B., & Boltze, M. (2020). A methodology for calibration of traffic micro-simulator for urban heterogeneous traffic operations. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(4), 507–519. 10.1016/j.jtte.2018.06.007

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Actualización del Plan Maestro de Movilidad*. Recuperado de <https://www.amb.gov.co/actualizacion-plan-maestro-de-movilidad/>
- Otković, I. I., Deluka-Tibljaš, A., & Šurdonja, S. (2020). Validation of the calibration methodology of the micro-simulation traffic model. *Transportation Research Procedia*, 45, 684–691. 10.1016/j.trpro.2020.02.110
- Paz, A., Molano, V., Martinez, E., Gaviria, C., & Arteaga, C. (2015). Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 432–443. 10.1016/j.trc.2015.03.001
- Paz, A., Shrestha, K., Arteaga, C., & Baker, D. (2020). Calibration of Microscopic Traffic Flow Simulation Models considering Subsets of Links and Parameters. *Journal of Advanced Transportation*, 202010.1155/2020/8897141
- PTV Planung Transport Verkehr AG. (2022). *PTV VISSIM 10 USER MANUAL*. Karlsruhe, Alemania
- Qiang, M., Khoo, H. L., & Cheu, R. L. (2008). Microscopic Traffic Simulation Model-Based Optimization Approach for the Contraflow Lane Configuration Problem. *Journal of Transportation Engineering*, 134(1), 41–49. 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:1(41)
- Tawfeek, M., Elesawey, M., El-Araby, K., & Abdel-Latif, H. (2018). *Calibration and Validation of Micro-Simulation Models Using Measurable Variables*

- Velasquez, M., & Hester, P. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10, 56–66.
- Wang, C., & Xu, C. (2018). On the Effects of Various Measures of Performance Selections on Simulation Model Calibration Performance. *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1), 3839814. 10.1155/2018/3839814
- Xiao-Yun Lu, Joyoung Lee, Danjue Chen, Joe Bared, Daniel Dailey, & Steven E. Shladover. (2014). *Freeway Micro-simulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data*
- Yang, Y., Qin, Y., Dong, H., & Zhang, Q. (2016). Parameter Calibration Method of Microscopic Traffic Flow Simulation Models based on Orthogonal Genetic Algorithm. *Journal of Visual Languages and Sentient Systems*, 10.18293/dms2016-047
- Yavuz, M. N., & Özen, H. (2024). CALIBRATION OF MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATION OF URBAN ROAD NETWORK INCLUDING MINI-ROUNDBABOUTS AND UNSIGNALIZED INTERSECTION USING OPEN-SOURCE SIMULATION TOOL. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 12210.20858/sjsutst.2024.122.17

Apéndices

Apéndice A. Revisión bibliográfica.

Apéndice B. Tabla matriz de evaluación.

Apéndice C. Scripts en AutoHotKey para ingreso de datos.

Apéndice D. Scripts en Python para análisis de resultados.

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