

**Análisis comparativo del funcionamiento de un software gratuito y un software comercial  
de microsimulación de transporte.**

**Cristian David Torres Bohórquez**

**Rubén Darío Velásquez Martínez**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Jhon Jairo Caceres Jimenez**

**PhD. Civil and Coastal Engineering**

**Co director**

**Nelson Deiwer Baza Solares**

**Ingeniero Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

### Dedicatoria

A Dios por haberme dado la vida y permitirme haber alcanzado este logro. A mis padres Carlos Torres y Dalgis Bohórquez por ser los pilares más importantes y demostrarme siempre su amor, confianza y apoyo incondicional, por los valores que me han inculcado y sobre todo ser un gran ejemplo para mi vida. A mi abuela, que desde el cielo guía mi camino para que siempre logre mis objetivos, por sus consejos, su motivación y especialmente, por su amor. A mis hermanos, por apoyarme siempre, por lo que representan para mí y por ser parte importante de una hermosa familia unida. A todos mis familiares y amigos que hicieron parte y contribuyeron de alguna u otra manera en este proceso.

**CRISTIAN DAVID TORRES BOHORQUEZ**

### Dedicatoria

Primeramente a Dios quien me dio sabiduría, fortaleza y fue quien guio mis pasos para culminar un logro más en mi vida, a mis padres, Ana Belén Martinez y Carlos Eduardo Velasquez que aunque estén en el cielo me enseñaron el valor de la responsabilidad y el sacrificio por conseguir lo que me proponga, a mi hermano Carlos Andrés Velasquez que con amor y sacrificio me ha apoyado incondicionalmente, a mi novia María Paula Robles quien me ha acompañado y motivado durante los últimos 3 años de mi carrera profesional, a la Sra Adelina y a su familia quienes me acogieron y fueron fuente de aprendizaje para mí vida, a las profesoras Yeini Silva y Liliana Martínez, quienes creyeron en mí y me apoyaron desde el inicio de este proceso, a la Sra Dalia, el Sr Gabriel y demás personas que confiaron y me brindaron su apoyo siempre.

**RUBEN DARIO VELASQUEZ MARTINEZ**

### Agradecimientos

Agradecemos a Dios por darnos la sabiduría, guiar nuestros pasos en este proceso y ser el apoyo y la fortaleza en los momentos de dificultad. Gracias a nuestras familias por ser los principales promotores de nuestros sueños. Agradecemos a nuestros docentes de la Escuela de Ingeniería Civil por haber transmitido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión. Un agradecimiento muy especial para el ingeniero Nelson Deiwer Baza Solares, quien nos acompañó y nos brindó tiempo, ideas y consejos necesarios para el desarrollo de este proyecto de grado, al profesor de la Universidad Industrial de Santander Yerly Fabian Martinez por los consejos y sugerencias y a los profesores de la Universidad de Bolonia, Cristian Poliziani y Joerg Schweitzer por su amabilidad, el material facilitado y todas las respuestas a las inquietudes planteadas.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	17
1. Revisión bibliográfica.....	19
1.1 Búsqueda Bibliográfica.....	19
1.1.1 Clasificación y selección de artículos .....	20
1.1.2 Bibliometría .....	20
1.2 Microsimulación de trafico .....	22
1.2.1 Aimsun.....	24
1.2.2 Sumo.....	25
1.2.3 Datos de entrada en modelos de microsimulación.....	26
1.2.4 Parámetros.....	27
1.2.5 Datos de salida .....	29
1.2.6 Características .....	31
2. Caracterización de la zona de estudio.....	33
2.1 Zona de influencia.....	34
2.2 Áreas de actividad sobre la zona de influencia.....	35
2.3 Caracterización de la malla vial .....	36
2.4 Detalles zona de influencia .....	36

---

2.4.1 Señalización vertical .....	37
2.4.2 Señalización horizontal .....	37
2.4.3 Semáforos .....	38
2.5 Aforos vehiculares .....	39
2.5.1 Procesamiento de la información en campo .....	40
2.5.2 Resultados de aforos vehiculares .....	42
3. Construcción y configuración del modelo .....	45
3.1 Aimsun .....	45
3.2 Sumo .....	46
4. Calibración y validación del modelo .....	47
4.1 Aimsun .....	49
4.2 Sumo .....	51
5. Resultados obtenidos .....	54
5.1 Aimsun .....	55
5.2 Sumo .....	55
5.3 Análisis y comparación de resultados .....	56
6. Conclusiones .....	58
7. Discusiones .....	60
Referencias .....	62

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Publicaciones por Año.....	21
<i>Figura 2.</i> Publicaciones por País.....	22
<i>Figura 3.</i> Zona de influencia .....	34
<i>Figura 4.</i> Áreas de actividad en la zona de influencia.....	35
<i>Figura 5.</i> Clasificación vial urbana.....	36
<i>Figura 6.</i> Señalización vertical.....	37
<i>Figura 7.</i> Señalización horizontal.....	38
<i>Figura 8.</i> Puntos de aforo .....	39
<i>Figura 9.</i> Codificación de movimientos en una intersección.....	40
<i>Figura 10.</i> Clasificación vehicular en Colombia.....	41
<i>Figura 11.</i> Distribución horaria de los flujos vehiculares sobre la intersección en el día típico..	43
<i>Figura 12.</i> Distribución horaria de los flujos vehiculares sobre la intersección en el día atípico.	43
<i>Figura 13.</i> Distribución Modal día típico.....	44
<i>Figura 14.</i> Distribución Modal día atípico .....	44
<i>Figura 15.</i> Red vial y centroides de generación y atracción Aimsun.....	46
<i>Figura 16.</i> Zonas de generación y atracción SUMO .....	47
<i>Figura 17.</i> Ubicación de detectores Aimsun .....	50

---

<i>Figura 18.</i> Ubicación de detectores Sumo.....	52
<i>Figura 19.</i> Comparación de la validación.....	54
<i>Figura 20.</i> Comparación de resultados de Aimsun y SUMO.....	57

## Lista tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Resultados obtenidos de la base de datos</i> .....	20
Tabla 2. <i>Artículos seleccionados para la revisión bibliográfica</i> .....	23
Tabla 3. <i>Ejemplos de proyectos realizados con Aimsun</i> .....	25
Tabla 4. <i>Ejemplos de proyectos realizados con Sumo</i> .....	26
Tabla 5. <i>Datos de entrada</i> .....	26
Tabla 6. <i>Parámetros</i> .....	28
Tabla 7. <i>Datos de salida</i> .....	30
Tabla 8. <i>Unidades de medida</i> .....	30
Tabla 9. <i>Características</i> .....	31
Tabla 10. <i>Fases semafóricas</i> .....	38
Tabla 11. <i>Factores de equivalencia</i> .....	41
Tabla 12. <i>Criterios de validación</i> .....	49
Tabla 13. <i>Validación bicicletas camiones y buses en Aimsun</i> .....	51
Tabla 14. <i>Validación livianos y motos en Aimsun</i> .....	51
Tabla 15. <i>Validación bicicletas camiones y buses en SUMO</i> .....	52
Tabla 16. <i>Validación livianos y motos en SUMO</i> .....	53
Tabla 17. <i>Resultados obtenidos de Aimsun</i> .....	55

Tabla 18. *Resultados obtenidos de SUMO* ..... 56

**Lista de apéndices**

Los apéndices relacionados a continuación los podrá encontrar adjuntos en el CD.

Apéndice A. Estado del arte

Apéndice B. Revisión Bibliográfica

Apéndice C. Señalización Vertical

Apéndice D. Señalización Horizontal

Apéndice E. Tiempos Semafóricos

Apéndice F. Aforos Vehiculares

Apéndice G. Matrices OD

Apéndice H. Calibración de Parámetros

Apéndice I. Validación del modelo Aimsun

Apéndice J. Validación del modelo Sumo

Apéndice K. Comparación de Validación

Apéndice L. Resultados de Aimsun

Apéndice M. Resultados de Sumo

## Resumen

**Título:** Análisis comparativo del funcionamiento de un software gratuito y un software comercial de microsimulación de transporte.\*

**Autor:** Cristian David Torres Bohorquez\*\*  
Rubén Darío Velasquez Martinez

**Palabras clave:** Aimsun, Comparación, Microsimulación, Software, Sumo.

### Descripción

El análisis de las problemáticas de tráfico vehicular que abarcan los grandes centros urbanos requiere de herramientas que permitan describir, predecir y tomar decisiones de forma eficiente. Un grupo de herramientas muy empleadas actualmente son las aplicaciones de software de microsimulación en transporte. Estos software permiten mediante la aplicación de modelos matemáticos y técnicas de simulación replicar las condiciones del mundo real y así abarcar una problemática determinada. En este trabajo se realizó el análisis comparativo entre dos softwares de microsimulación de tráfico vehicular. Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), un software europeo de carácter comercial (versión 8.2.0) y Sumo (Simulation of Urban Mobility), un software europeo gratuito (versión 1.3.1) para identificar similitudes y diferencias en sus características funcionales, parámetros de calibración, datos de entrada y datos de salida. El análisis se hizo a partir de una revisión bibliográfica y posteriormente la elaboración de un modelo de simulación en transporte que se realizó en cada una de las aplicaciones con datos reales recopilados sobre una zona de influencia que abarca la intersección de la Carrera 28 con Calle 41 ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Se logró determinar mediante la implementación de estas dos herramientas computacionales, que Sumo presenta una mayor complejidad en la construcción de modelos con respecto a Aimsun, sin embargo, los resultados arrojados y su funcionamiento fueron similares catalogando este software libre como equiparable en un nivel de detalle microscópico frente a Aimsun.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez, PhD. Civil and Coastal Engineering. Co director: Nelson Deiwer Baza Solares, Ingeniero Civil

### Abstract

**Title:** Comparative analysis of the operation of a free software and commercial transport microsimulation software.\*

**Author:** Cristian David Torres Bohorquez\*\*  
Rubén Darío Velasquez Martinez

**Keywords:** Aimsun, Comparison, Microsimulation, Software, Sumo.

### Description

The analysis of the problems of vehicular traffic covering major urban centers require tools to describe, predict and make decisions efficiently. A group of tools are currently very used software applications in transport microsimulation. This software enables by applying mathematical models and simulation techniques to replicate the conditions of the real world and thus cover a particular problem. In this paper the comparative analysis between two software vehicular traffic microsimulation was performed. Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), a European commercial software (version 8.2.0) and Sumo (Simulation of Urban Mobility), European Free software (version 1.3.1) to identify similarities and differences in their functional characteristics, calibration parameters, input data and output data. The analysis was made from a literature review and subsequently the development of a simulation model transport held in each of the applications with real data collected on a catchment area encompassing the intersection of Carrera 28 with Calle 41 located in the city of Bucaramanga, Colombia. it possible to determine by implementing these computational tools that Sumo presents greater complexity in building models with respect to Aimsun, however, the results obtained and operation were similar cataloging this free software as comparable in detail microscopic against Aimsun.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez, PhD. Civil and Coastal Engineering. Co director: Nelson Deiwer Baza Solares, Civil Engineer

## Introducción

La planificación y el desarrollo de redes y sistemas de tráfico vehicular son una preocupación y un interés creciente a nivel mundial, ya que las ciudades necesitan que sus estructuras viales tengan capacidad y sincronía en su operación para las demandas actuales y futuras. El aumento de la flota de vehículos afecta a los grandes centros urbanos, que comienzan a presentar en sus horas de máxima demanda más congestionamiento, mayor índice de accidentalidad, mayores tiempos de viaje y velocidades relativamente bajas. Estas externalidades negativas generan estrés e irritabilidad sobre los usuarios de las vías, afectándolos económicamente y disminuyendo su calidad de vida. (Dela H., 2016), (Thomson I., 2001)

El análisis y la búsqueda de soluciones a este tipo de problemas requiere en muchos casos del uso herramientas computacionales que permitan describir, predecir y entender el comportamiento del fenómeno vehicular estudiado. Estas herramientas son los llamados simuladores de tráfico que cuentan con diferentes niveles de detalle para el análisis. Por ejemplo, para trabajar con parámetros de gran escala como la red de carreteras de una ciudad, se utilizan los macrosimuladores. Para analizar con un nivel de detalle más preciso tanto el comportamiento de los vehículos como el entorno de simulación se emplean los microsimuladores y una red de carreteras con un nivel de detalle más completo incluyendo anchos de carriles, pendientes, intersecciones, entre otros. Para un nivel intermedio entre los dos sistemas de simulación anteriores, se trabaja con simuladores mesoscópicos (Dela H., 2016). Como se mencionó anteriormente, la toma de decisiones en la ingeniería del transporte se soporta en el análisis hecho a partir de herramientas que respaldan las soluciones a implementar. Es usual que dicho soporte se dé por medio de un modelo de

microsimulación de transporte, el cual busca replicar las condiciones del mundo real mediante una representación matemática y visual que considera el comportamiento de los viajeros, los vehículos y la infraestructura.

Como consecuencia del surgimiento de esta necesidad en la actualidad se han estructurado herramientas de simulación a partir de la implementación de software de microsimulación privados y gratuitos. Un ejemplo de software comercial es AIMSUN, cuya licencia oscila entre 20.000€ y 25.000€ (Burgos, 2017), lo cual es equivalente en pesos colombianos a un valor de alrededor \$70 Millones. Por otro lado, está el software SUMO que es de licencia gratuita. Estas dos herramientas pueden ser utilizadas por académicos o tomadores de decisiones para analizar problemas relacionados con el transporte que garanticen la obtención de resultados confiables. (Barceló, 2010)

El objetivo del presente artículo es determinar qué tan equiparable es un software de licencia libre como lo es Sumo (Simulation of Urban Mobility) con respecto a un software de licencia comercial (Aimsun) de acuerdo con el funcionamiento y los resultados generados.

Para el desarrollo de este proyecto como primer paso se realizó una revisión bibliográfica de documentos de carácter científico e investigativo con el fin de determinar las características que describen la funcionalidad de cada una de las aplicaciones, los principales datos de entrada, los parámetros más relevantes que impactan de forma considerable los modelos y los datos de salida más usuales solicitados en los estudios de microsimulación de tráfico vehicular, evaluando cada una de estas propiedades. Posteriormente mediante datos reales de aforos vehiculares y detalles de la red vial tomados en la zona de estudio, se construyó un escenario de simulación sobre cada una de las aplicaciones, que permitió comparar las herramientas de acuerdo con la creación del modelo y los resultados que se obtuvieron.

## 1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica tiene como propósito exponer una síntesis de revisiones realizadas durante un proceso de investigación documental, seguido de conclusiones o discusiones del tema estudiado (Peña, 2010). Este proceso permitió tener una visión más clara por parte de los investigadores para la generación de los modelos de microsimulación en cada una de las herramientas computacionales utilizadas.

### 1.1 Búsqueda Bibliográfica

La búsqueda de información para la investigación se realizó por medio de la base de datos BASE (Bielefeld Academic Search Engine), sin embargo, se consultaron otras bases de datos como Scopus, Science Direct y ASCE. De acuerdo a la dirección que tomaban los resultados de las búsquedas, BASE contenía la mayoría de estos, por lo cual se optó por utilizarla. Para la búsqueda se determinaron las palabras clave como: *Sumo*, *Aimsun*, *Microsimulación de tráfico* y *Comparación*. Con el fin de obtener mejores resultados, se configuraron combinaciones mediante operadores booleanos presentados en la siguiente tabla.

Tabla 1.

*Resultados obtenidos de la base de datos.*

Combinaciones empleadas	Artículos
Microsimulation of traffic AND (Aimsun OR Sumo OR comparison)	413
Aimsun OR Sumo AND characteristics	93
Aimsun OR Sumo AND comparison	152

**1.1.1 Clasificación y selección de artículos.** Para seleccionar los artículos que fueron la base de la investigación desarrollada, se realizó una selección de documentos cuyo título tuviera mayor relación con el tema a investigar, en total se preseleccionaron 63 artículos que cumplieron este criterio. Consecutivamente se leyeron los resúmenes de cada artículo, dónde se descartaron 26 documentos que no aportaban información pertinente para la investigación, por último, se leyeron tanto la introducción como las conclusiones de los artículos restantes, dando como resultado 12 documentos para el análisis y extracción de información. La tabla de revisión bibliográfica se presenta en el Apéndice A.

**1.1.2 Bibliometría.** En este proceso se analizó el estado de investigación en cuanto a las publicaciones, autores, citas y crecimiento de la investigación a lo largo del tiempo, entre otros.

Para ello, se utilizó la herramienta de Microsoft Excel con el objetivo de ordenar y cuantificar la información sobre comparaciones, características, parámetros y funcionamiento de software de microsimulación y así, tener mayor precisión. A continuación, se presenta la bibliometría relacionada con la búsqueda bibliográfica realizada. En la “Figura 1” se encuentra el número de

publicaciones por año y en la “Figura 2” se expone las publicaciones por país de los artículos preseleccionados.

Como se puede observar en la “Figura 1”, en el año 2013 y 2012 hubo un mayor número de investigaciones y documentos sobre software de microsimulación, incluyendo las características y estudios de desempeño que permiten realizar comparaciones entre estas herramientas.



Figura 1. Publicaciones por Año.

Como se muestra en la “Figura 2” de acuerdo con la preselección de los artículos realizada por parte de los autores, Estados Unidos cuenta con la mayor producción científica sobre el tema en estudio seguido de países como Alemania, Italia y Brasil.

Los Artículos seleccionados se presentan de forma resumida en la Tabla 2, indicando el nombre del autor, una breve descripción donde se indicó que se realiza en el proyecto y de acuerdo a la categoría del software implementado si es de licencia comercial o gratuita.

## 1.2 Microsimulación de tráfico

Actualmente, los modelos microscópicos de simulación de tráfico o microsimuladores se consideran como una herramienta avanzada de representación de tránsito vehicular sobre una red de transporte, que es adecuada para el desarrollo y evaluación de sistemas inteligentes de transporte (Bravo, 2007). Permiten modelar, de forma flexible, cualquier tipo de geometría posible y proporcionan una representación más eficiente del comportamiento de una red vial (Schweizer, 2014). Estas herramientas también permiten a los profesionales y/o autoridades encargadas del sistema de transporte de una ciudad, establecer un conjunto de políticas de control del tránsito y operabilidad de transporte urbano, además, de realizar predicciones de acuerdo con la gran variedad de resultados que estos proveen. (Vieira Hallmann, 2011)

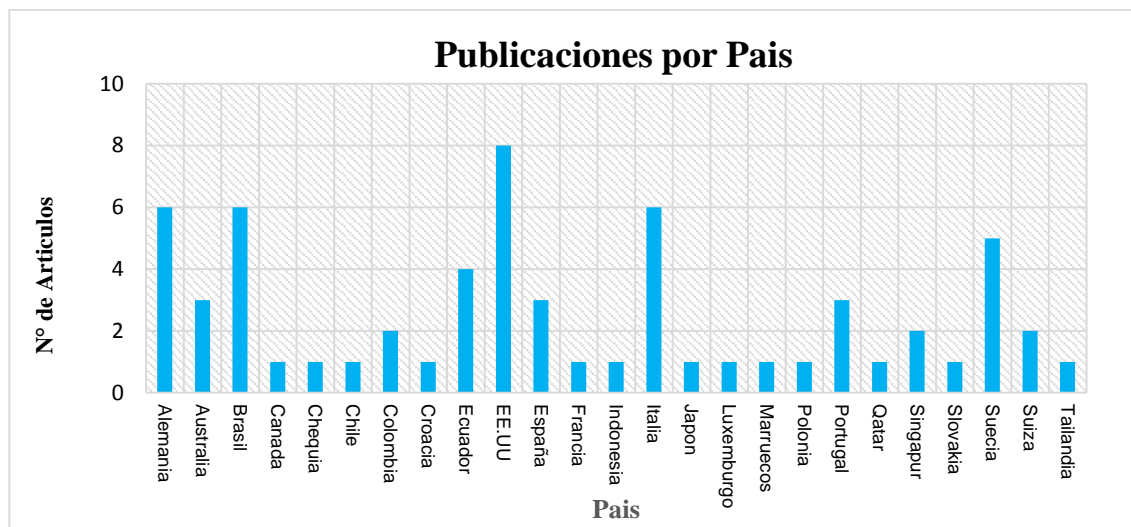


Figura 2. Publicaciones por País.

Tabla 2.

*Artículos seleccionados para la revisión bibliográfica.*

Autores (Año, País)	Descripción	Software	
		Gratuito	Comercial
Saidallah et al. (2016, Marruecos)	Comparación de simuladores de tráfico de acuerdo con sus características y criterios establecidos en el estudio.	✓	✓
Bravo (2007, Ecuador)	Análisis y control de tráfico vehicular, mediante una herramienta de simulación.	X	✓
Vieira (2011, Brasil)	Comparación entre software simuladores de tránsito.	✓	✓
Zhi et al. (2005, Singapur)	Comparación de software de transporte comerciales.	X	✓
Valladares (2016, Colombia)	Comparación entre un enfoque macroscópico y microscópico por medio de herramientas especializadas en cada nivel.	X	✓
Ají y Taufiq (2012, Suecia)	Comparación de un software gratuito y uno comercial.	✓	✓
Dela Bruna (2016, Brasil)	Comparación entre dos microsimuladores.	X	✓
Barceló (España,2010)	Fundamentos de la simulación del tráfico, analizando diferentes software de transporte.	✓	✓
Behrisch et al. (2013, Alemania)	Descripción y actualización del Software Sumo.	✓	X
Jeannotte et al. (2004, EE. UU)	Herramienta para la selección de software microsimulación.	✓	✓
Coloma (2019, Ecuador)	Estudio de las herramientas de generación de viaje en Sumo por medio de un estudio específico.	✓	✓
Mota (2011, Brasil)	Estudio de entornos de microsimulación basado principalmente en software libre.	✓	X

Estos modelos de microsimulación se caracterizan por describir el comportamiento de conductores y vehículos de forma individual.

Aproximadamente cada grupo de investigación de tráfico en el mundo hoy en día ha desarrollado su propio software (Bravo, 2007), basados en algoritmos como el seguimiento de vehículos, cambio de carril y aceptación de brechas, con el propósito de generar resultados por medio de las relaciones entre usuarios, vehículos y elementos que conforman la red (Bravo, 2007). Los modelos de microsimulación, el funcionamiento y las características que componen las herramientas empleadas encuentran descritos en el Apéndice B.

**1.2.1 Aimsun.** AIMSUN es un software de transporte comercial, fue desarrollado y es comercializado por Transport Simulation Systems (TSS), empresa ubicada en España (Elalaoui, Fergougui, & Saidallah, 2016). Es un simulador considerado actualmente como uno de los más avanzados ya que cuenta con tres niveles de detalle (Micro, Meso y Macro simulación), por lo cual, tiene la capacidad de tratar con diferentes redes de tráfico: Redes urbanas, autopistas, arterias, intersecciones y combinaciones entre estas (TSS-Transport Simulation Systems, 2010). Tiene muchas ventajas sobre otras aplicaciones en el mercado (Elalaoui, Fergougui, & Saidallah, 2016), pero contar con su licencia significa invertir una buena cantidad de dinero, que no todo profesional o entidad tiene para invertir en ella. (Burgos, 2017)

Aimsun ha sido usado en diferentes partes del mundo y ha colaborado en diferentes proyectos de investigación (TSS-Transport Simulation Systems, 2010). En la Tabla 3, se puede observar algunos ejemplos de estos proyectos.

Tabla 3.

*Ejemplos de proyectos realizados con Aimsun*

Software	Proyectos de aplicación e investigación
Aimsun	Centro de control en la ciudad de Madrid (TSS-Transport Simulation Systems, 2010).
Aimsun	Singapore: Technology trial for real-time traffic simulation and prediction (TSS-Transport Simulation Systems, 2010).
Aimsun	Leicester: urban Traffic management and Air Quality (uTRAQ) (TSS-Transport Simulation Systems, 2010).
Aimsun	Gold Coast: Predictive Solutions Trial (TSS-Transport Simulation Systems, 2010)

**1.2.2 Sumo.** SUMO es un paquete de simulación de tráfico creado principalmente por el Instituto de Investigación de Transporte del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en el año 2000. Es básicamente un simulador de tráfico vehicular microscópico de código abierto altamente portátil. Desde la versión 0.26.0 existe la posibilidad de modelar escenarios con un nivel de detalle mesoscópico, pero no presenta el funcionamiento ideal para este tipo de modelos (Simulador SUMO, sf). Está compuesto por una serie de aplicaciones que ayudan a preparar y realizar la simulación de tráfico. Una de estas aplicaciones o extensiones utilizadas para el desarrollo de esta investigación es SumoPy, elaborada con el lenguaje de programación Python (Simulador SUMO, sf), contenida en una interfaz gráfica de usuario que proporciona herramientas con más funcionalidades, de fácil uso y permite administrar gran cantidad de datos para la ejecución de modelos complejos.

Se han desarrollado una gran cantidad de proyectos de investigación y aplicación con Sumo (Simulador SUMO, sf), además de proyectos que se encargan del continuo progreso de la

herramienta gracias a que es de código abierto (Simulador SUMO, sf). En la Tabla 4, se presentan algunos ejemplos de proyectos realizados con este software.

Tabla 4.

*Ejemplos de proyectos realizados con Sumo*

Software	Proyectos de aplicación e investigación
Sumo	ORINOKO: improvements on mobility in the city of Nürnberg (Simulador SUMO, sf).
Sumo	HubChain: simulating autonomous public transport in rural areas (Simulador SUMO, sf).
Sumo	iTranSIM - Simulation-based Vehicle Location (TSS-Transport Simulation Systems, 2010)
Sumo	Soccer2006: Traffic prognosis during the FIFA-WorldCup 2006 (Simulador SUMO, sf).

**1.2.3 Datos de entrada en modelos de microsimulación.** Los datos mínimos de entrada requeridos, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, que deben ser previamente establecidos para generar un escenario de simulación en un software de microsimulación se listan en la siguiente tabla. (Barceló, 2010), (Ronaldo & Taufiq, 2016):

Tabla 5.

*Datos de entrada*

Datos de entrada	
Información para la creación de la red	Configuración de la vía
	Número de Carriles
	Señales y dispositivos de control
	Longitud del carril
Información de demanda	Modos de viaje
	Matrices OD
	Definiciones de flujo y relaciones de giro

Principalmente se requiere la localización del sitio estudiado, el plano o mapa que contiene los detalles que componen la red de carreteras y el sitio de estudio (Ronaldo & Taufiq, 2016). La representación de una red o malla vial se da por medio de conexiones o nodos, que se unen entre sí mediante bordes que representan los carriles donde transitan cada uno de los modos de viaje.

Las herramientas de microsimulación hoy por hoy cuentan con la capacidad de integrarse con aplicaciones de localización geográfica, que permiten importar una red de carreteras con múltiples detalles facilitando el procedimiento de creación de la malla vial. En el proceso de generación de demanda de tráfico vehicular es muy común encontrar dos formas de definirla, mediante matrices O/D (Origen/Destino) o por medio de flujos de tráfico en cada una de las secciones que compone la red. (Barceló, 2010), (Ronaldo & Taufiq, 2016).

**1.2.4 Parámetros.** Los parámetros juegan un papel importante en el proceso de calibración y validación de un modelo, ya que los resultados pueden verse afectados por la sensibilidad que presentan algunos de estos (Vieira Hallmann, 2011). La composición de un modelo de microsimulación se encuentra determinada por tres elementos principales, el vehículo, la vía y el conductor (Bravo, 2007), que cuentan con una gran cantidad de parámetros. Partiendo de la revisión bibliográfica se identificaron los parámetros con los que cuenta el software Aimsun (Dela H., 2016), también los principales parámetros que intervienen significativamente sobre los datos de salida de un modelo de microsimulación tanto en Aimsun como en Sumo (Ronaldo & Taufiq, 2016), con base en lo anterior, fue posible establecer los parámetros más relevantes y empleados para el proceso de validación y calibración en modelos de microsimulación.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros identificados por medio de la investigación realizada. En el caso del vehículo se identificaron: el dimensionamiento, la distancia mínima a la que se

detienen el vehículo líder y el seguidor (Ronaldo & Taufiq, 2016), el modelo Lane change que consiste en comprobar la posibilidad de cambio de carril, la necesidad de llevarlo a cabo y si es deseable (Dela H., 2016), la aceleración y desaceleración máxima que puede lograr el vehículo en cualquier circunstancia, el modo de viaje que representa y la velocidad máxima alcanzada. Respecto a los parámetros asociados al conductor se encuentran: el tiempo de reacción y la imperfección de este, que consisten en el tiempo utilizado por el conductor para reaccionar al cambio de velocidad presentado por el vehículo que se encuentra adelante (Ronaldo & Taufiq, 2016) y que tan competente puede ser el conductor, respectivamente. Finalmente, los parámetros identificados que están asociados a la vía son: el número de carriles en cada uno de los tramos que compone la red, el ancho de carril, la velocidad máxima permitida y la prioridad de la vía que define la preferencia de paso. (Dela H., 2016)

Tabla 6.

*Parámetros*

Parámetros	Aimsun	Sumo
<b>Vehículo</b>		
Ancho y longitud	✓	✓
Distancia Mínima entre vehículos	✓	✓
Modelo Lane Change	✓	✓
Máxima de aceleración	✓	✓
Máxima de Desaceleración	✓	✓
Tipo de vehículo	✓	✓
Velocidad máxima	✓	✓

Tabla 6. (Continuación)

Parámetros	Aimsun	Sumo
<b>Conductor</b>		
Imperfección del conductor	✓	✓
Tiempo de reacción del conductor	✓	✓
<b>Vía</b>		
Ancho de carril	✓	✓
Cantidad de Carriles	✓	✓
Prioridad de la vía	✓	✓
Velocidad máxima permitida	✓	✓

**1.2.5 Datos de salida.** En esta sección se analiza la capacidad de estas herramientas para producir diferentes resultados en el área de eficiencia, movilidad, medio ambiente y productividad. A partir del criterio de medidas de eficiencia encontrada en el documento Traffic Analysis Toolbox (FHWA, Traffic Analysis Toolbox Volume II, 2004), para la selección de las herramientas de microsimulación y de la revisión bibliográfica previamente consultada, se establecieron los principales datos de salida con el fin de concluir sobre los resultados generados más importantes. En la Tabla 7 se encuentran los principales datos de salida generados en los modelos de microsimulación, sus unidades correspondientes de acuerdo cómo son obtenidos del software y si son generados por cada una de estas aplicaciones.

Tabla 7.

*Datos de salida*

Datos de Salida		Aimsun		Sumo
Cola media vehicular	✓	Veh	✓	Veh
Consumo de combustible	✓	L	✓	ml/s
Densidad vehicular	✓	Veh/Km	✓	Veh/Km
Distancia total de viaje vehicular	✓	Km	✓	m
Emisión de contaminantes	✓	g/s	✓	mg/s
Flujo vehicular	✓	Veh/h	✓	Veh/h
Nivel de servicio	✓	A-F	X	-
Tiempo de paradas	✓	h	✓	s
Tiempo de demora o atrasos	✓	seg/Km	✓	s
Tiempo total de viaje vehicular	✓	h	✓	s
Tiempo de espera total vehicular (Esperando fuera)	✓	h	✓	s
Velocidad promedio	✓	Km/h	✓	m/s

Tabla 8.

*Unidades de medida*

Unidad	Símbolo
Gramos	g
Horas	h
Kilómetros	Km
Litros	L
Miligramos	mg
Mililitros	ml
Número de vehículos	Veh
Segundos	s

Como se puede observar en la Tabla 7 tanto Aimsun como Sumo, poseen la misma cantidad de datos relevantes de salida a excepción del nivel de servicio el cual es un dato de salida de Aimsun, pero no de Sumo. El nivel de servicio describe las condiciones operativas de un flujo de tráfico y es muy utilizado para estudios de tráfico. Otra diferencia evidente son las unidades de entrega de los resultados, las cuales difieren en la mayoría de los datos de salida de ambas aplicaciones.

**1.2.6 Características.** Respecto al estudio y análisis de las características entre ambos software, es difícil hacerlo de forma no subjetiva (Dela H., 2016), ya que un aspecto en particular puede ser considerado adecuado para un usuario y poco adecuado o útil para otro. Por ejemplo, la facilidad de manejo en Sumo es más factible para un usuario familiarizado con la programación de scripts (Cheu R., Tan, & Lee, 2003). De acuerdo con la revisión bibliográfica y el documento (FHWA, Traffic Analysis Toolbox Volume II, 2004) de la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos, se establecieron las características que se consideran relevantes para las aplicaciones de microsimulación de transporte. Ver Tabla 9.

Tabla 9.

*Características*

Característica	Aimsun	Sumo
Licencia	La licencia requiere de un permiso, que se adquiere mediante un costo de capital, por tanto, es un software de tipo comercial. (Ronaldo & Taufiq, 2016)	El software y todas sus herramientas se pueden descargar desde la página oficial. No requiere de ningún costo para contar con esta, por tanto, es un software libre (Ronaldo & Taufiq, 2016), (Simulador SUMO, sf).

Tabla 9. (Continuación)

Característica	Aimsun	Sumo
Documentación Técnica	Completa, la herramienta cuenta con artículos e informes de implementación de esta, además presenta una ayuda con acceso directo desde su interfaz. (Ronaldo & Taufiq, 2016)	Resume la información en su página web, es decir que es necesario contar con el servicio de internet para acceder a esta. La información presentada en la página web, no es suficiente para tener una implementación más rápida y sencilla del software. (Ronaldo & Taufiq, 2016)
Disponibilidad del código fuente	Aimsun, no permite acceder, distribuir copias, así como modificar el código fuente (Ronaldo & Taufiq, 2016)	Sumo, cuenta con su código de fuente abierto que permite tener un continuo desarrollo por parte de la comunidad que lo implementa (Ronaldo & Taufiq, 2016), (Vieira Hallmann, 2011).
Facilidad de manejo	Generalmente es fácil de usar, contiene una interfaz que cuenta con herramientas con funciones intuitivas. No requiere un usuario con habilidad de programación (Ronaldo & Taufiq, 2016), (Vieira Hallmann, 2011).	El software Sumo, requiere un conocimiento previo de los comandos de línea de código Python o C++ y la manipulación de archivos XML (Ronaldo & Taufiq, 2016). Cuenta con una extensión que ofrece una interfaz GUI, un editor de red y un lenguaje que facilita su uso, conocido como SumoPy para la creación de simulaciones multimodales complejas (Simulador SUMO, sf).
Nivel de Detalle	Permite realizar modelos con los tres niveles de detalle, Macroscópico, Microscópico y Mesoscópico. (Ronaldo & Taufiq, 2016)	Microscópico principalmente, a partir de la versión Sumo 0.26.0, tiene la posibilidad de modelar partes del escenario en nivel de detalle Mesoscópico (Simulador SUMO, sf).
Sistema operativo	Aimsun tiene soporte para el sistema operativo de Windows, Sistemas Mac OS X y Linux. (Vieira Hallmann, 2011).	Sumo está disponible en sistemas operativos como Windows, Mac OS X y Linux, (Vieira Hallmann, 2011). (Barceló, 2010).

Tabla 9. (Continuación)

Característica	Aimsun	Sumo
Requisitos de Post-Procesamiento	Esta herramienta produce los resultados en formatos que no requieren más procesamiento. Cuenta con un módulo de solo informes con múltiples opciones para que el usuario configure visualizaciones graficas en tiempo real de los resultados (Ronaldo & Taufiq, 2016), (Vieira Hallmann, 2011)..	Directamente desde Sumo es necesario ingresar al código y solicitar las medidas que se darán contenidas en diferentes archivos adicionales. La extensión SumoPy desde su interfaz permite obtener los resultados sin un requisito de Post-procesamiento y de igual manera en archivos adicionales (Simulador SUMO, sf).
Integración con otras aplicaciones de transporte	Presenta compatibilidad con los siguientes software: Vissim, Visum, Paramics, Synchro, GIS, CONTRAM, SATURN y TRANSYT. (TSS-Transport Simulation Systems, 2010)	Presenta compatibilidad con los siguientes software: Vissim, Visum, OpenDRIVE, MATsim, ArcView y RoboCup (Simulador SUMO, sf).
Visualización	La visualización de los escenarios en esta herramienta puede ser bidimensional (2D) y tridimensional (3D) (Ronaldo & Taufiq, 2016).	La animación presenta por esta herramienta es de bajo detalle a comparación con Aimsun, ya que solo permite visualizar el procedimiento de la simulación en dos dimensiones (2D) (Vieira Hallmann, 2011)., (Ronaldo & Taufiq, 2016).

## 2. Caracterización de la zona de estudio

La caracterización operacional de la zona de estudio se realizó a partir de registros en campo, lo cual permitió identificar sentidos de circulación vehicular, semáforos, volúmenes vehiculares, señalización horizontal y vertical. El análisis y la depuración de información permitió generar el

suministro de información a los programas de microsimulación utilizados. La información secundaria requerida por los simuladores fue principalmente el estudio de suelos de la zona, la geometría, señalización horizontal y vertical, semaforización, aforos vehiculares, acopios de camiones de cargas, rutas de buses, ubicación de paraderos y las matrices origen destino para cada uno de los modos de viaje. (Mejía A., 2016)

## 2.1 Zona de influencia

La zona de influencia se determinó con base en un previo reconocimiento visual sobre el sector que compone la intersección ubicada en la Carrera 28 con Calle 41 barrio Mejoras públicas de la ciudad de Bucaramanga, abarcando puntos que intervienen en el comportamiento de esta. La zona, se encuentra delimitada de Sur a Norte por las calles 42, 41 y 40, y de Oeste a Este por la carrera 27, 27A, 28, 28A y carrera 29, como es posible evidenciarlo en la “Figura 3”.

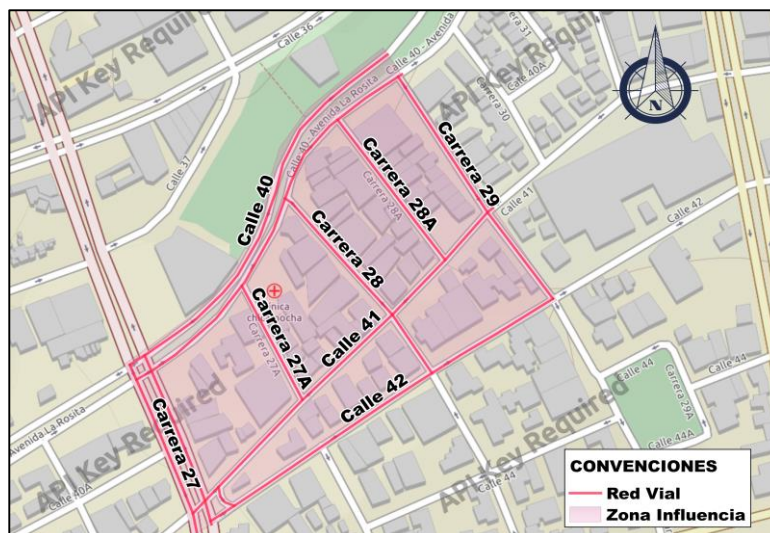


Figura 3. Zona de influencia

## 2.2 Áreas de actividad sobre la zona de influencia

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Barrio Mejoras públicas de la comuna 13 o comuna oriental en la ciudad de Bucaramanga, Santander. Como se puede observar en la “Figura 4”, el área de actividad que predomina sobre la zona de influencia es residencial tipo 2 considerada como una zona residencial con áreas delimitadas para comercio y servicios de escala local y zonal, además, se puede evidenciar en una menor proporción, pero siendo considerable una zona comercial y una zona dotacional que respectivamente corresponden a un centro comercial y la clínica Chicamocha los cuales representan puntos de atracción vehicular. (Consejo de Bucaramanga, 2014)

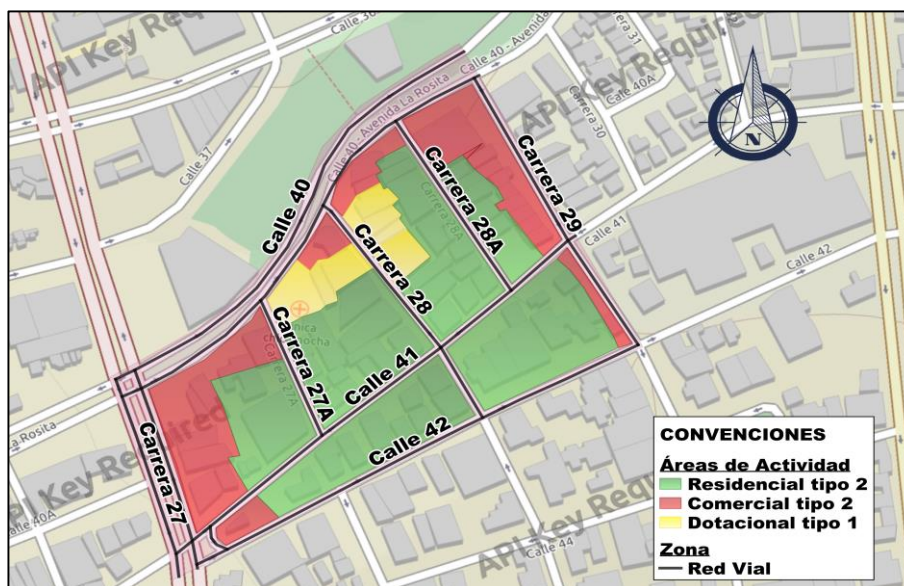


Figura 4. Áreas de actividad en la zona de influencia. Adaptado Alcaldía de Bucaramanga. POT Bucaramanga 2014 - 2027. Disponible en: <https://bit.ly/2FHvxmI>.

### 2.3 Caracterización de la malla vial

La zona de influencia comprende vías de conexión urbana primarias y terciarias, pero en su gran mayoría pertenecen a redes locales de nivel 1 y 2 que se caracterizan por penetrar los sectores residenciales o accesos principales a barrios y canalizar flujos vehiculares de baja velocidad hacia los sectores de mayor actividad (Consejo de Bucaramanga, 2014). La distribución de redes vehiculares mencionada anteriormente se puede evidenciar en la “Figura 5”.

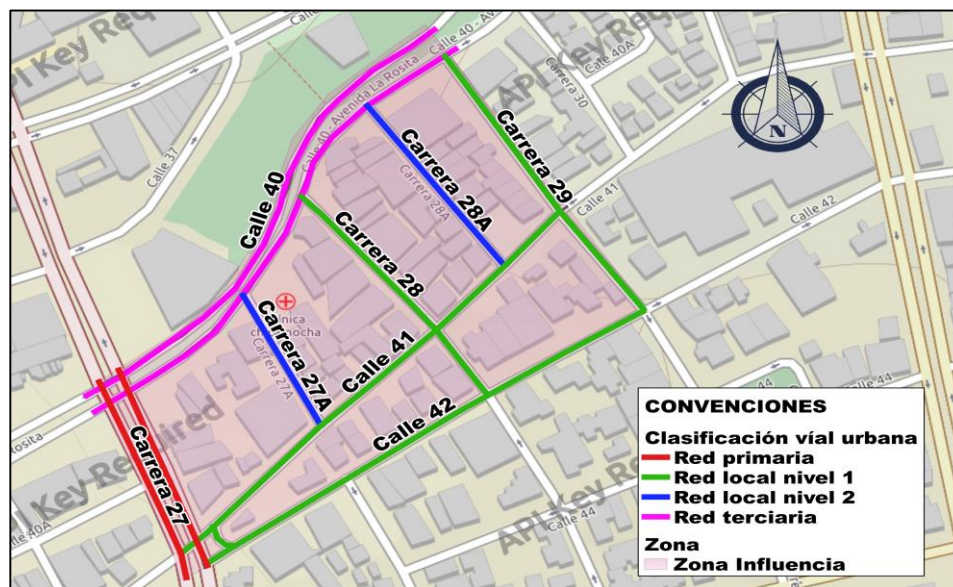


Figura 5. Clasificación vial urbana. Adaptado del Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2014 – 2027. Disponible en: <https://bit.ly/2FHvxmI>.

### 2.4 Detalles zona de influencia

Se realizó una inspección visual de la zona de influencia con el fin de corroborar los sentidos de cada una de las secciones viales, se registraron medidas de ancho de calzada, seguido de un registro

cuantitativo de las señalizaciones viales y la toma de las fases de los semáforos que se encontraban sobre la zona. Lo anteriormente mencionado como insumos necesarios para la creación de la red en cada una de las herramientas utilizadas.

**2.4.1 Señalización vertical.** Se registraron 19 señales verticales en total de tipo reglamentaria, preventivas e informativas de acuerdo con el Manual de Señalización vial. La “Figura 6” muestra su ubicación dentro de la zona de influencia, además, en el Apéndice C se especifica con fotografías las señales en su respectiva ubicación.

**2.4.2 Señalización horizontal.** Paralelamente se registraron 30 señales horizontales como de acuerdo con lo expuesto en el Manual de Señalización vial. La “Figura 7” muestra su ubicación y en el Apéndice D se puede observar específicamente con fotografías las señales en su respectiva ubicación.

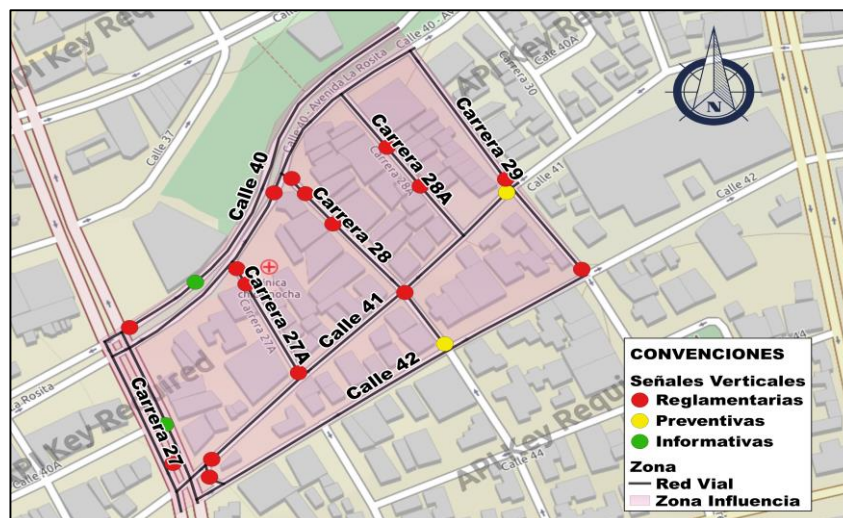


Figura 6. Señalización vertical



## 2.5 Aforos vehiculares

La recolección de datos de la demanda vehicular correspondió a un día típico y un día atípico, sobre la intersección ubicada en la carrera 28 con calle 41, la cual era la intersección principal de estudio, esto se hizo con el fin de determinar en cuál de estos días se presentaba la hora de máxima demanda. El aforo correspondiente al día típico se realizó el jueves 14 de noviembre del 2019 en el horario comprendido entre las 5:00 AM y las 7:00 PM, posteriormente el aforo para el día atípico se realizó el sábado 16 de noviembre del 2019 en el horario comprendido entre las 5:00 AM y las 7:00 PM. Los aforos restantes se realizaron de acuerdo con la hora de máxima demanda, el jueves 28 de noviembre sobre tres puntos que intervienen en el comportamiento de la intersección. En la “Figura 8” se puede observar la disposición de los puntos de recolección de información.

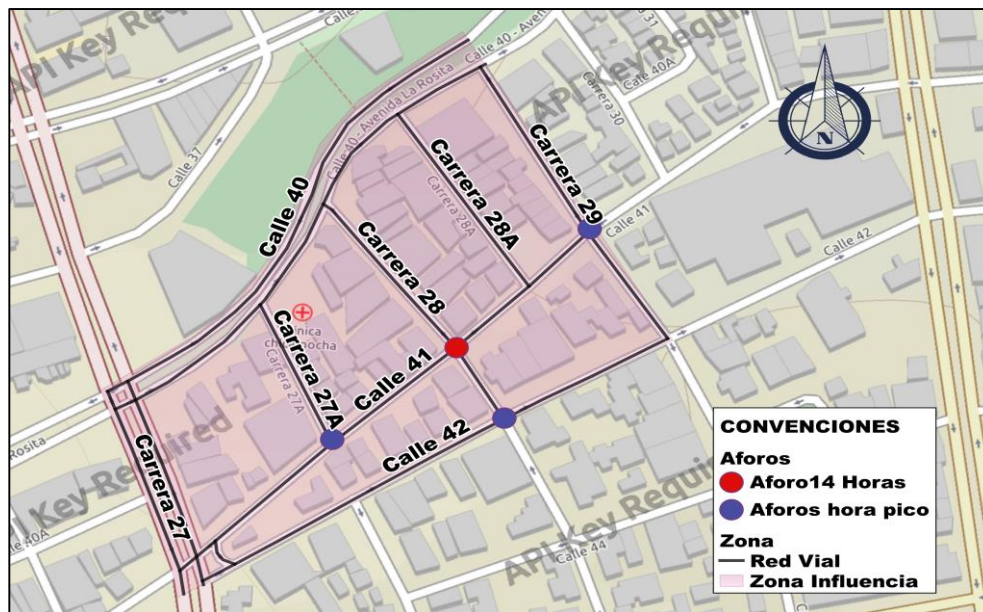
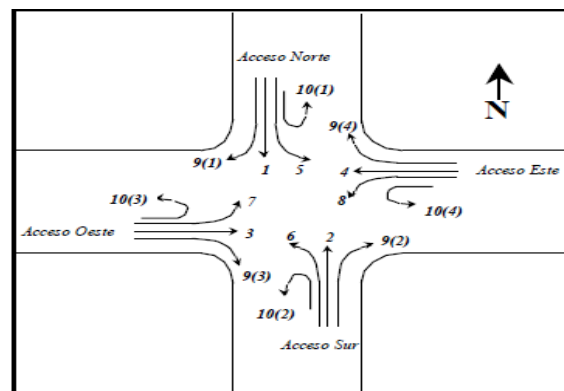


Figura 8. Puntos de aforo

**2.5.1 Procesamiento de la información en campo.** La codificación de los giros vehiculares presentes sobre la intersección se caracterizó de acuerdo con la dirección de origen y destino, en la “Figura 9” se presenta esta codificación según el manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte. (Cal y Mayor y Asociados, 2005)

Para los vehículos se hace necesario realizar una clasificación para definir de qué forma son considerados en Colombia. Esta clasificación se realiza de acuerdo con el ministerio de Obras Públicas y Transporte, hoy en día conocido como Ministerio de Transporte (Ipus, Chaves-Pabón, & Riascos, 2016) . Esta clasificación se presenta en la “Figura 10”.

Para identificar la cantidad de flujo máxima y la hora pico sobre la intersección vial de la carrera 28 con calle 41, fue necesario realizar la conversión de los flujos de vehículos mixtos a vehículos equivalentes, es decir, expresar cada modo de transporte como un único vehículo equivalente. Los factores de equivalencia empleados se tomaron a partir del Manual de diseño geométrico de carreteras que se muestra en la Tabla 11.



*Figura 9.* Codificación de movimientos en una intersección. Adaptado de Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte (2005). Tomo III.


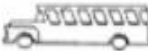






TIPO DE VEHÍCULOS		DESCRIPCIÓN
AUTOMÓVILES Y MICROBUSES		
BUSES		
CAMIONES	C2P	
	C2G	
	C3	
	C4	
	C5	
	>C5	

Figura 10. Clasificación vehicular en Colombia. Adaptado de Manual de diseño geométrico de carreteras. (2008) Colombia.

Tabla 11.

*Factores de equivalencia*

Modo	F. E
Bicicleta	0.5
Moto	0.75
Liviano	1
Bus	2.8
Camión	2.8

Nota. Manual de diseño geométrico de carreteras. (2008) Colombia

**2.5.2 Resultados de aforos vehiculares.** Como resultado del procesamiento realizado a la información de campo obtenida, se pudo determinar que la hora de máxima demanda sobre la intersección vial, se presentó el día típico en el intervalo de tiempo entre la 1:45 pm y las 2:45 pm, como se puede observar en la “Figura 11”. El máximo nivel de demanda corresponde a la cantidad de 1,355 vehículos mixtos, lo cual corresponde a 1,244 vehículos equivalentes de acuerdo con el cálculo realizado mediante los factores de equivalencia. Los resultados se pueden ver en el Apéndice F.

En el día atípico de acuerdo con los resultados es posible evidenciar en la “Figura 12” que la demanda disminuye con respecto a la solicitada en un día típico, algo que se esperaba debido a que la zona de estudio se compone en un mayor porcentaje de zona residencial. El máximo nivel de demanda corresponde a la cantidad de 1,038 vehículos mixtos, que corresponden a 961 vehículos equivalentes, en el horario comprendido entre las 09:45 am y las 10:45 am, de acuerdo con el cálculo realizado mediante los factores de equivalencia.

A través de la recopilación de los datos, fue posible realizar una distribución modal del tráfico vehicular en el periodo total de aforo, tanto para el día típico (ver “Figura 13”) como para el día atípico (ver “Figura 14”) resultando vehículos livianos como taxis, autos y camionetas particulares los de mayor presencia, seguidos por las motocicletas y una muy pequeña porción perteneciente a las bicicletas y vehículos pesados como buses, camiones y tractocamiones.

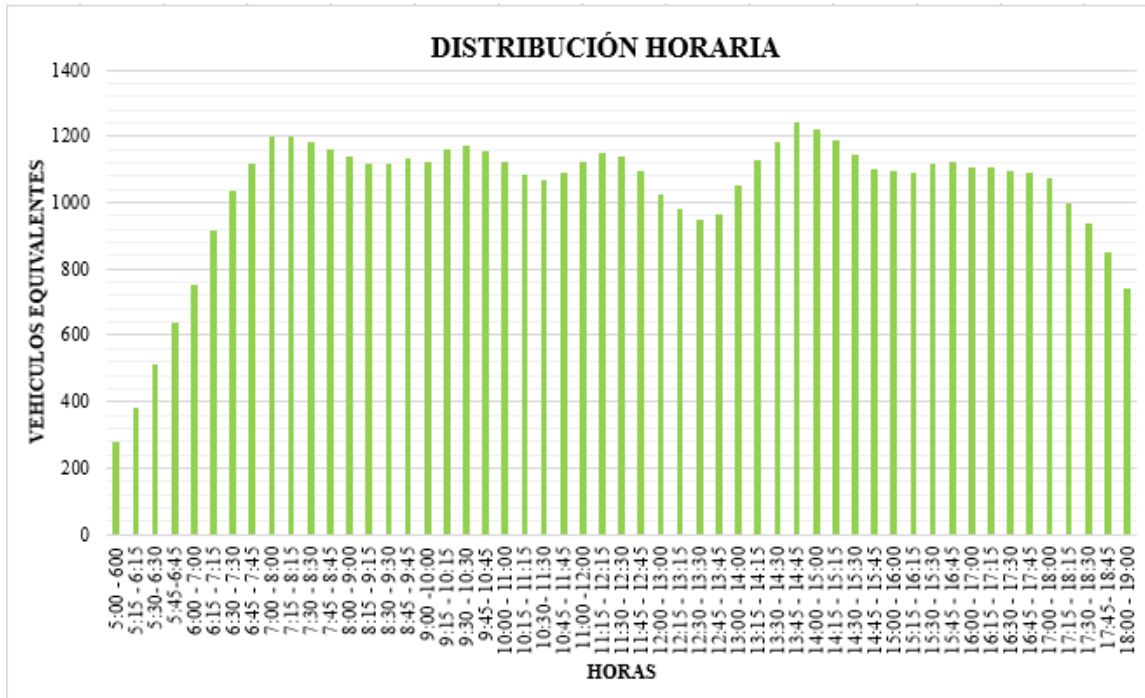


Figura 11. Distribución horaria de los flujos vehiculares sobre la intersección en el día típico.

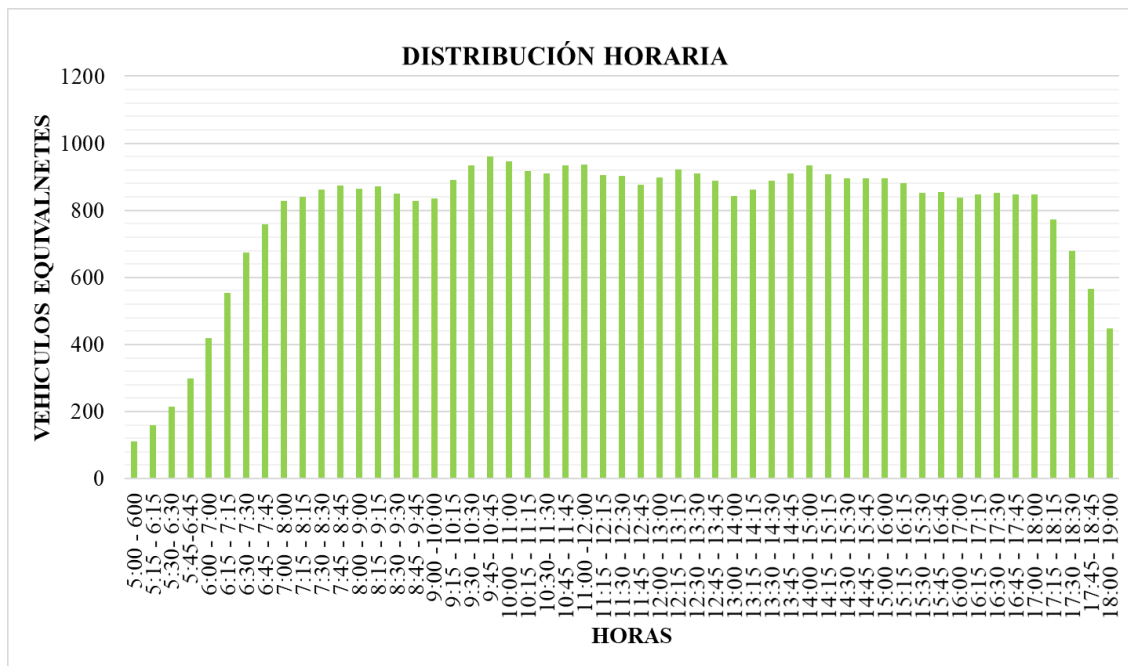


Figura 12. Distribución horaria de los flujos vehiculares sobre la intersección en el día atípico.

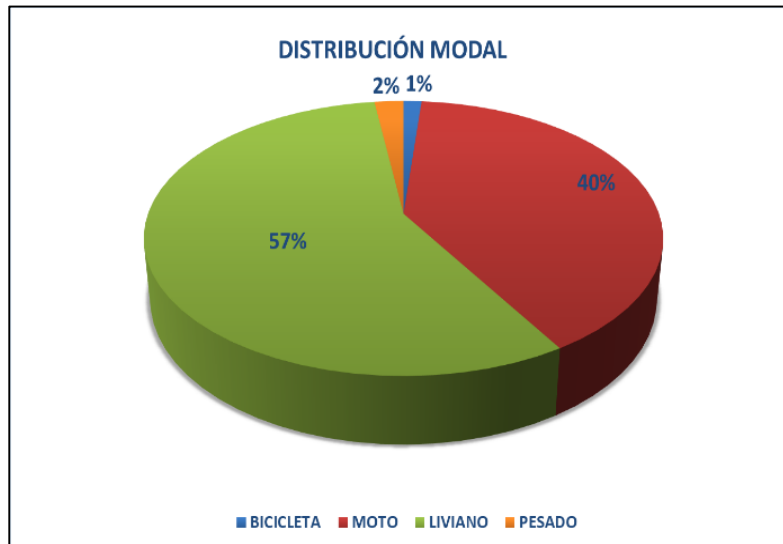


Figura 13. Distribución Modal día típico

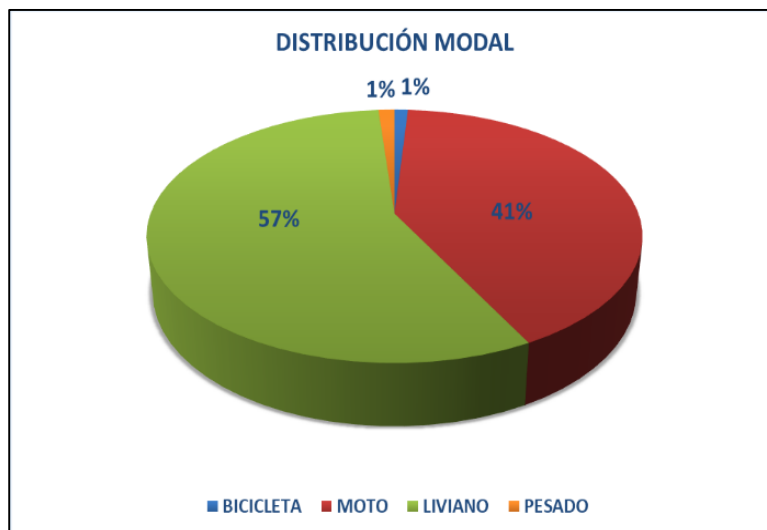


Figura 14. Distribución Modal día atípico

### 3. Construcción y configuración del modelo

El proceso de construcción de un modelo comprende de cuatro etapas interdependientes entre sí, la geometría y características físicas de la red vial, señales y equipos de control, la demanda vehicular y los productos obtenidos (Mejía A., 2016). Para la creación de la geometría en cada uno de las aplicaciones fue necesario conocer su funcionamiento e identificar los datos necesarios, que se determinaron en la revisión bibliográfica. La red fue creada a partir de la localización dada por la herramienta Open Street Map, común para las aplicaciones empeladas en esta investigación. A continuación, se definieron 5 modos de viaje clasificados como: Livianos, motos, buses, camiones y bicicletas. A partir de la información recopilada en los diferentes aforos y su debido procesamiento matemático se definieron las matrices OD para cada uno de los modos de viaje. Ver Apéndice G.

#### 3.1 Aimsun

La licencia para el uso académico del software Aimsun (Versión 8.2) utilizado para la creación del modelo fue proporcionada por el grupo de investigación Geomática. El proceso de generación de la red vial fue rápido y sencillo gracias a que Aimsun cuenta con una interfaz intuitiva, lo cual permitió ajustar la red de acuerdo con las condiciones tomadas en campo. El proceso de generación de demanda se realizó por medio de matrices OD, lo que hizo necesario identificar zonas de generación y atracción de vehículos. En total se identificaron 6 zonas, de las cuales, 2 son de generación, 2 de atracción y 2 que realizan ambos procedimientos. La disposición de estas zonas

se realizó de acuerdo a las direcciones de los viajes observados en campo. En la “Figura 15” es posible observar la ubicación de los centroides que representan las zonas.



Figura 15. Red vial y centroides de generación y atracción Aimsun

### 3.2 Sumo

El software de microsimulación Sumo (Versión 1.3.1) utilizado para la creación del modelo fue tomado desde la página oficial del mismo. Para la creación y generación de la demanda para el simulador, se utilizó la extensión SumoPy que permitió realizar un proceso de forma más sencilla y rápida gracias a su interfaz. Después de importar la red por medio de Open Street Map, desde SumoPy, con ayuda del editor de red Netedit, se ajustó la red de acuerdo con las condiciones presentadas en campo. De la misma manera que en Aimsun fue necesario crear las zonas de generación y atracción de vehículos (6 zonas), por medio de polígonos que delimitaran estas zonas. En la “Figura 16” es posible apreciar los polígonos que representan cada una de las zonas.

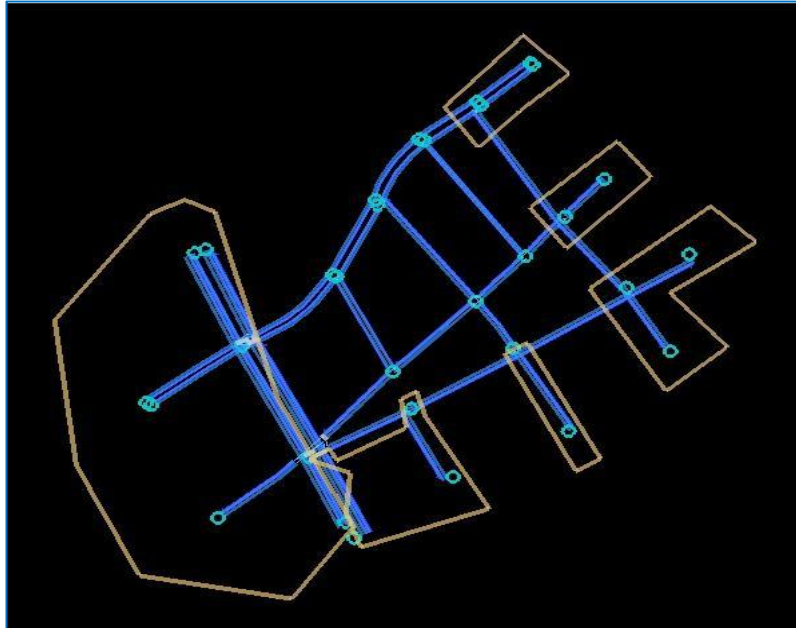


Figura 16. Zonas de generación y atracción SUMO

#### 4. Calibración y validación del modelo

El proceso de calibración de un modelo de microsimulación se realiza ajustando los parámetros predeterminados contenidos en el software a las condiciones locales (Schweizer, 2014). El primer paso fue realizar el acondicionamiento de la red adecuando el ancho de carril con las dimensiones tomadas en campo, el número de carriles, la velocidad permitida de acuerdo con lo expuesto en el código nacional de tránsito y las señales reglamentarias que componen la zona de influencia. Posteriormente los parámetros correspondientes a los modos de viaje de acuerdo con los tipos de vehículos expuestos en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, se ajustó la longitud, el ancho, la velocidad máxima y el modelo de cambio de carril. Las bicicletas y motocicletas se

dejaron con sus valores predeterminados. Los valores de los parámetros expuestos se pueden evidenciar en el Apéndice H.

El método de asignación de tráfico escogido para este proyecto fue el método estocástico, el cual, tiene una mejor representación de realidad en el modelo. Este método permite que el usuario de la vía escoja una ruta evaluando factores como el tiempo de viaje, el camino más rápido y económico para llegar a su destino. De acuerdo al comportamiento que se presenta en el transcurso del recorrido, desde su partida, el usuario puede tomar una ruta más efectiva que le permita alcanzar su destino, evitando colas de vehículos y velocidades bajas que afectan el tiempo de viaje (Cheu R., Tan, & Lee, 2003). Existen diferentes métodos para realizar la calibración y lograr validar los resultados obtenidos, entre estos están: el indicador GEH, el error cuadrático medio RMSE y el coeficiente de correlación o coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, entre otros (Mejía A., 2016). Dado que se cuentan con datos tomados de campo mediante los aforos vehiculares, en este trabajo se hizo uso del indicador GEH.

El indicador estadístico GEH, llamado así en honor a su creador Geoffrey E. Havers, representa la bondad de ajuste de un modelo y se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$GEH = \sqrt{\frac{2 * (O - M)^2}{(O + M)}} \quad (1)$$

O = Volumen de tráfico observado en campo

M = Volumen de tráfico que pasa en el modelo

Según (Barceló, 2010), los criterios establecidos para que un modelo de asignación de tráfico se encuentre calibrado de acuerdo con el indicador estadístico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12.

*Criterios de validación*

<b>Criterio</b>	<b>Aceptación</b>
<b>GEH &lt;5</b>	60%
<b>GEH &lt;10</b>	95%
<b>GEH &lt;12</b>	100%

Se considera que la asignación de tráfico de un modelo está calibrada cuando todos los corredores de control estudiados tengan un GEH inferior a 12, más del 95% un GEH menor a 10 y al menos el 60% posean un GEH menor a 5. (Barceló, 2010)

#### **4.1 Aimsun**

El proceso de validación en Aimsun se realizó por medio de detectores. La configuración de estos detectores (bandas azules en la “Figura 17”) sobre la red se realizó sobre los puntos en los cuales se llevaron a cabo los aforos vehiculares.

Mediante estos detectores fue posible obtener la cantidad de vehículos que pasaron sobre cada uno de los carriles y de acuerdo con la ecuación del indicador GEH, se verificó si el modelo se encontraba correctamente calibrado conforme a las condiciones establecidas. Los resultados obtenidos para cada uno de los detectores, de acuerdo con el modo de viaje y el proceso de validación realizado se encuentran en el Apéndice I del presente proyecto.



Figura 17. Ubicación de detectores Aimsun

La validación se realizó para cada modo de viaje, en Aimsun se realizaron cinco iteraciones, ya que se considera que cinco son suficientes para obtener resultados validos de un modelo de simulación de tráfico (Department of Planning, Transport and Infrastructure, 2019). Los resultados obtenidos para las bicicletas, los camiones y buses (ver tabla 13) se validaron en su totalidad, por tanto, los resultados tienen buena aceptación de acuerdo con los criterios del indicador GEH, mientras que para los livianos y las motos (ver tabla 14) aunque se validaron, todos los criterios no obtuvieron un 100% de aceptación, pero cumplieron con lo establecido según los criterios de validación expresados en la Tabla 12.

Tabla 13.

*Validación bicicletas camiones y buses en Aimsun*

<b>Criterio</b>	<b>Aceptación</b>
<b>GEH &lt;5</b>	100%
<b>GEH &lt;10</b>	100%
<b>GEH &lt;12</b>	100%

Tabla 14.

*Validación livianos y motos en Aimsun*

<b>Criterio</b>	<b>Aceptación</b>
<b>GEH &lt;5</b>	86%
<b>GEH &lt;10</b>	100%
<b>GEH &lt;12</b>	100%

## 4.2 Sumo

En el caso de Sumo, el proceso de validación también se llevó a cabo por medio de los detectores (bandas amarillas en la “Figura 18”). Estos detectores fueron ubicados espacialmente en la misma posición que se ubicaron en el modelo de Aimsun. De igual forma se obtuvo la cantidad de vehículos y se realizaron los cálculos correspondientes para ejecutar el proceso de validación mediante el indicador GEH. Los resultados conseguidos para cada uno de los detectores en Sumo se encuentran en el Apéndice J del presente proyecto.

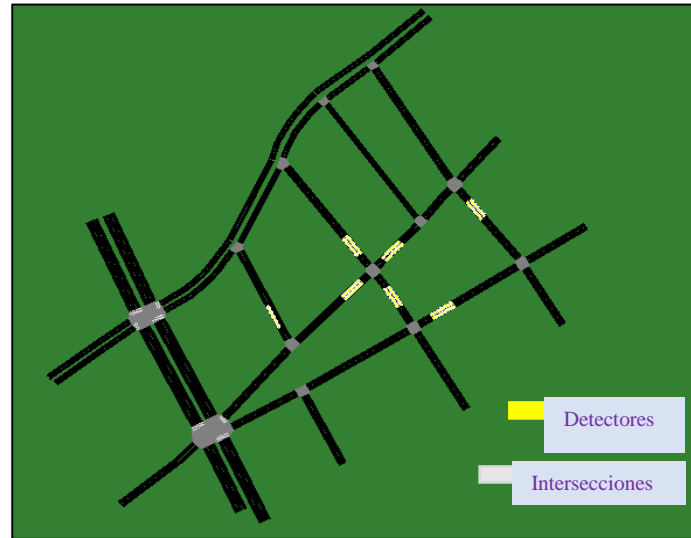


Figura 18. Ubicación de detectores Sumo

La validación se realizó para cada modo de viaje, en Sumo se realizaron cinco ejecuciones del modelo para obtener resultados válidos (Department of Planning, Transport and Infrastructure, 2019). Las bicicletas, los camiones y buses (ver tabla 15), se validaron en su totalidad por tanto los resultados tienen buena aceptación de acuerdo con los criterios del indicador GEH. Mientras que para los livianos y las motos (ver tabla 16), aunque se validaron, todos los criterios no obtuvieron un 100% de aceptación, pero cumplieron con lo establecido por el indicador.

Tabla 15.

*Validación bicicletas camiones y buses en SUMO*

Criterio	Aceptación
<b>GEH &lt;5</b>	100%
<b>GEH &lt;10</b>	100%
<b>GEH &lt;12</b>	100%

Tabla 16.

*Validación livianos y motos en SUMO*

<b>Criterio</b>	<b>Aceptación</b>
<b>GEH &lt;5</b>	86%
<b>GEH &lt;10</b>	100%
<b>GEH &lt;12</b>	100%

Según los resultados proporcionados por los detectores en el proceso de validación se puede observar que Aimsun y Sumo presentaron un comportamiento similar y a su vez estos se acercan a los datos recopilados en campo, excepto para el detector número 5, donde la cantidad de vehículos que transitaron según los datos de campo fueron 1,083 vehículos, en Aimsun fueron simulados 1,078 vehículos, mientras que Sumo arrojó un resultado de 889 vehículos, presentando una diferencia de 189 vehículos entre los dos software lo cual corresponde a una diferencia del 17,5% aproximadamente (Ver “Figura 19”). Los resultados proporcionados por los softwares de la cantidad de vehículos simulados comparados con los datos reales se encuentran en el Apéndice K.

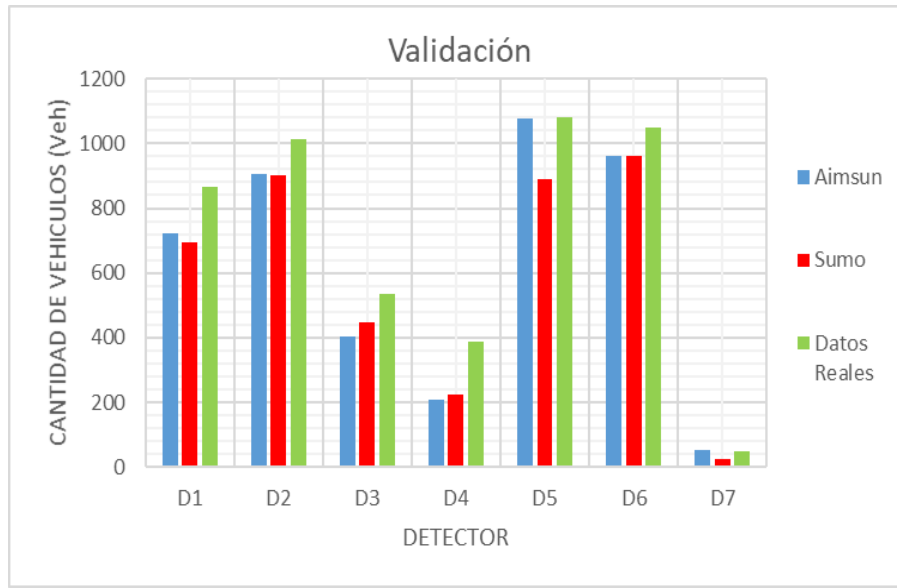


Figura 19. Comparación de la validación

## 5. Resultados obtenidos

De acuerdo con la revisión bibliográfica se escogieron los datos de salida más comunes en un estudio de tráfico e importantes en la selección de una herramienta de microsimulación y además con el filtro de que las dos herramientas implementadas en este estudio tuvieran la capacidad de generar simultáneamente dichos resultados para efectuar el proceso de comparación. Se analizaron, la velocidad promedio de los vehículos durante el periodo de simulación en toda la red, la distancia total que corresponde a la suma de las distancias recorridas por todos los vehículos que ingresaron a la red de carreteras durante el periodo de simulación, la densidad que se considera como el número de vehículos por unidad de longitud, el tiempo total de viaje definido como la suma de los tiempos que los vehículos permanecieron en la red durante todo el periodo de

simulación y la cantidad de vehículos que ingresaron y salieron de la simulación. El proceso de simulación correspondió a un intervalo de 1 hora, que representaba la hora de máxima demanda en un día típico.

## 5.1 Aimsun

Aimsun una vez finaliza el proceso de simulación desde su misma interfaz permite la visualización de los resultados. Ver Apéndice L.

Los resultados evaluados para el estudio se pueden observar en la Tabla 17.

Tabla 17.

*Resultados obtenidos de Aimsun*

<b>Aimsun</b>	<b>Unidad</b>	<b>Media</b>
Densidad	Veh/Km	19,69
Velocidad	Km/h	16,91
Distancia total de viaje	Km	1287,18
Tiempo total de viaje	h	131,57
Vehículos fuera	Veh	3266,8

## 5.2 Sumo

En el proceso de generación de datos de salida para este software, fue necesario realizar un post-procesamiento que requiere de generar archivos XML, importarlos a Excel para obtener una mejor visualización y facilitar el procedimiento de cálculos. Ver Apéndice M.

Los resultados evaluados obtenidos en el software Sumo para el estudio se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18.

*Resultados obtenidos de SUMO*

Sumo	unidad	Media
Densidad	Veh/Km	20,37
Velocidad	Km/h	15,69
Distancia total de viaje	Km	1208,64
Tiempo total de viaje	h	113,89
Vehículos fuera	Veh	3293

### 5.3 Análisis y comparación de resultados

Teniendo en cuenta los resultados evaluados en cada una de las aplicaciones, fue posible determinar que existe una proximidad entre ellos. En la Figura 20 se puede evidenciar la comparación de cada uno de los resultados entre las dos herramientas consideradas para el estudio.

De acuerdo a la gráfica, los resultados que presentan una mayor similitud de Sumo con respecto a Aimsun, son la densidad vehicular y la cantidad de vehículos simulados o fuera de la simulación, mientras el tiempo total de viaje es el resultado con mayor diferencia. En la Tabla 19 se pueden observar los resultados obtenidos de la sustracción entre los datos de salida de Aimsun y los datos de salida de Sumo, además una diferencia porcentual obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$Dif_{\%} = \frac{D_{Sumo} - D_{Aimsun} * 100}{D_{Aimsun}} \quad (2)$$

$Dif_{\%}$  = Diferencia porcentual entre los microsimuladores.

$D_{Aimsun}$  = Datos obtenidos en Aimsun.

$D_{Sumo}$  = Datos obtenidos en Sumo.

Tabla 19.

*Diferencia y diferencia porcentual de resultados*

<b>Resultado</b>	Densidad	Velocidad	Distancia total de viaje	Tiempo total de viaje	Vehículos fuera
Unidad	Veh/Km	Km/h	Km	h	Veh
Diferencia	0,68	1,21	78,53	17,7	26,2
Media					
Diferencia	3%	7%	6%	13%	1%
Media (%)					

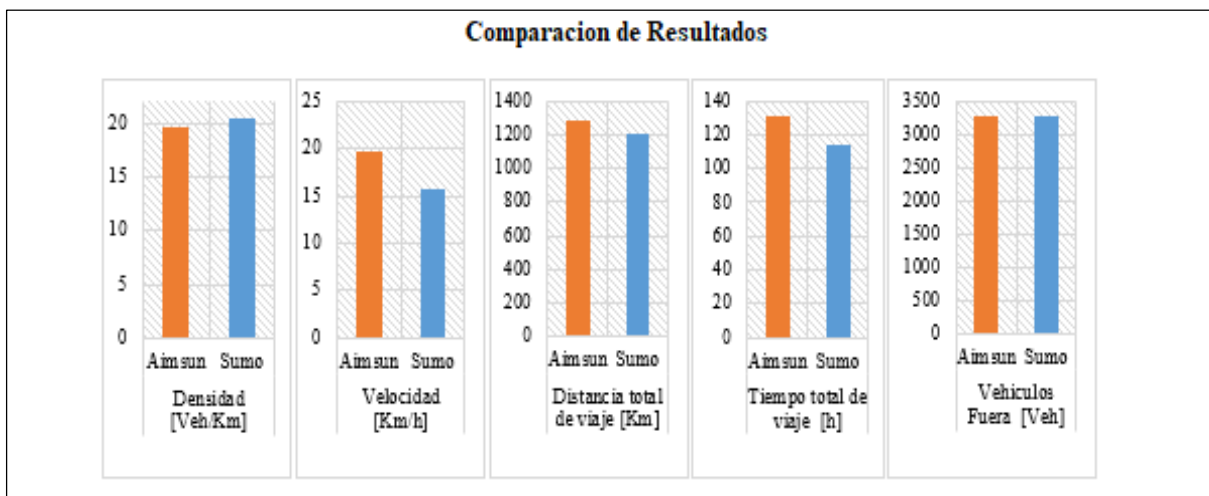


Figura 20. Comparación de resultados de Aimsun y SUMO

## 6. Conclusiones

☒ Las herramientas computacionales de simulación de tráfico urbano se han convertido en un elemento vital para el ingeniero de transporte, con el objetivo de evaluar el funcionamiento de una red de carreteras y mejorar su funcionamiento a través de la toma de decisiones.

☒ El proceso de revisión bibliográfica permitió definir que ambos softwares independientemente de la forma de ingreso de datos requieren de los mismos datos de entrada, principalmente una red o mapa y la demanda vehicular, para generar una modelo de microsimulación.

☒ En cuanto a las características, datos de salida y parámetros, los softwares Aimsun y Sumo son relativamente similares. Aimsun cuenta con mejores opciones para la construcción de una red y para la solicitud de los datos de salida, mientras que Sumo depende de extensiones o archivos externos para la creación de la red y visualización de los resultados, por lo cual es más propenso a errores por parte del usuario al momento de ingresar datos.

☒ Los modelos de microsimulación empleados por ambos software se basan en la velocidad segura y el cambio de carril, sin embargo, la diferencia principal radica en el algoritmo que lo representa, en el caso de Aimsun el modelo de Gipps y para Sumo el modelo KrauB que es una derivación del modelo de Gipps.

☒ Los softwares en estudio siguen el modelo clásico de transporte o modelo cuatro etapas, no obstante, actualmente las etapas de generación/atracción, distribución y reparto modal, funcionan básicamente como procedimientos para generar datos de entrada en la simulación final. En cuanto

a la asignación, se considera el paso más importante, Aimsun cuenta con 5 modelos, mientras que Sumo cuenta solo con 3 modelos de asignación.

☒ En definitiva, se puede concluir que a pesar de que hay estudios sobre las aplicaciones empleadas, existen vacíos por llenar en cuanto al funcionamiento de estas herramientas, especialmente para el software libre.

☒ Para la creación del modelo y ejecución de la simulación, Sumo presenta un mayor nivel de complejidad debido a que no cuenta con mucha documentación y requiere conocimientos básicos en el lenguaje de programación Python, mientras que Aimsun permite realizar todo el proceso desde su interfaz contando con un soporte de usuario eficiente e intuitivo.

☒ Los resultados obtenidos en el proceso de validación para las dos aplicaciones permiten identificar que Aimsun presenta una mayor proximidad que Sumo en 4 de los 7 detectores utilizados, mientras que Sumo presenta una aproximación mayor que Aimsun en 3 de los 7 detectores. Sin embargo, aunque Sumo se aproxima en menor medida a los datos reales es confiable desde el punto de vista de validación de resultados y posee la ventaja de ser un software libre.

☒ La velocidad, la densidad y el tiempo total de viaje son los datos de salida más empleados para analizar el funcionamiento de una red vehicular. Se pudo determinar mediante estos resultados que a pesar de que el funcionamiento de las herramientas esté basado en algoritmos de microsimulación diferentes, los valores obtenidos en los datos de salida no presentaron diferencias significativas entre las dos herramientas.

☒ La visualización de la simulación en 2D permite observar que el comportamiento reflejado por los vehículos dentro de la simulación es muy semejante entre los dos softwares. Aimsun cuenta

con una visualización en 3D, una herramienta adicional que lo convierte en un software de mayor atracción con respecto a Sumo.

☒ Sumo es un software en constante desarrollo con características muy similares en modelos de microsimulación a las de un software comercial como Aimsun, además de acuerdo a la comparación de resultados ejecutada con respecto a Aimsun se pudo determinar que la implementación de Sumo fue considerada de buena aceptación y confiabilidad para fines académicos y técnicos.

☒ Los modelos representan una herramienta de vital importancia en la toma de decisiones de un ingeniero, por lo cual es importante contar con acceso a herramientas de modelado confiables y de accesibles.

## 7. Discusiones

No existen estándares absolutos que se deban satisfacer en la calibración de un modelo, esto porque el nivel de calibración obtenido depende de los objetivos de la modelación (Steer Davies Gleave, Transconsult and Dirección General de Desarrollo Carretero, 2006). Aunque en el proceso de calibración y validación de un modelo de simulación de tráfico vehicular es recomendable utilizar un 90% de la totalidad de los aforos vehiculares tomados en campo para la calibración y un 10% para realizar un proceso de validación más riguroso (Steer Davies Gleave, Transconsult and Dirección General de Desarrollo Carretero, 2006), el presente proyecto tiene como finalidad verificar el funcionamiento de las herramientas, mas no realizar un proceso riguroso de validación

que permita obtener resultados confiables para dar un juicio sobre el comportamiento de la red vial analizada. (Ortúzar & Willumsen, 2009)

## Referencias

- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. Nueva York: Springer. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 145.
- Bravo, Y. (2007). *Análisis y control de tráfico vehicular en zonas críticas de la ciudad de Quito, mediante simulación*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Burgos, N. (2017). *El programa de simulación de tráfico 'AIMSUN' ya está en marcha*. España: Burgos Noticias. Obtenido de <https://www.burgosnoticias.com/actualidad/burgos/013154/el-programa-de-simulacion-de-traffic-aimsun-ya-esta-en-marcha>.
- Cal y Mayor y Asociados-Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá. (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la administración del Tránsito y el Transporte*. Bogotá D.C.
- Cheu R., L., Tan, Y., & Lee, D. (2003). *Comparison of paramics and getram/aimsun Microscopic Traffic Simulation Tools*. Singapore: National University of Singapore, Department of Civil Engineering .
- Coloma, G.W. (2019). *Análisis de las herramientas de generación de demanda de tráfico en sumo*. Caso de estudio: Vías de acceso a Quito”, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Consejo de Bucaramanga. (2014). *Acuerdo 011 de 2014*. Bucaramanga.
- Dela H., B. (2016). *Estudo comparativo de dois microssimuladores de trafego - Aimsun e Vissim*. Universidade Federal de Santa Catarina: Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Civil.
- Department of Planning, Transport and Infrastructure. (2019). *Government of South Australia. Metropolitan Adelaide Traffic Simulation and Assessment Model (MATSAM)*. Traffic Simulation Model Development Guidelines (Aimsun Next).

- Elaloui, A., Fergougui, A., & Saidallah, M. (2016). *A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators*. Marruecos: Moulay Ismail University, Faculty of Science.
- FHWA, Traffic Analysis Toolbox Volume II. (2004). *Decision Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools*. Publication N° FHWA-HRT-04-039.
- Ipus, O., Chaves-Pabón, S., & Riascos, M. (2016). *Evaluación técnica mediante procesos de microsimulación en tres intercesiones en Montería, Córdoba*. Córdoba, Colombia.
- Mejía, A.; De Jesús, V. (2016). *Comparación de un Enfoque Macroscópico y otro Microscópico al Estimar las Demoras por la Congestión Urbana*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil.
- Mota Pinheiro, L. (2011). *Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microsimulação de tráfego Urbano*. Universidade Estadual de Londrina, Brasil.
- Ministerio del transporte (2008). *Manual de Diseño Geométrico para Carreteras*. Bogota, Instituto Nacional de Vías.
- Ortúzar, J., & Willumsen, L. (2009). *Modelos de transporte*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Peña, L. (2010). *La revisión bibliográfica*.
- Ronaldo, A., & Taufiq, I. (2016). *Comparison of the two microsimulation software aimsun & sumo for highway traffic modelling*. Universidade Federal de Santa Catarina: Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Civil, .
- Schweizer, J. (2014). *Traffic Micro-simulation Modelling & SUMOPy User Manual*. Università Degli Studi di Bologna, School of Engineering and Architecture.

Steer Davies Gleave, Transconsult and Dirección general de desarrollo carretero. (2006).

*Modelación de demanda para carreteras de cuota.* Steer Davies Gleave y Transconsult y Dirección General de Desarrollo Carretera.

Simulador SUMO. (sf). *Documentación y manuales de aplicación.* Obtenido de <http://www.sumo.dlr.de/userdoc/Tools/Visualization.html>.

Thomson I., B. A. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencia económicas y sociales.* Santiago de Chile: CEPAL, División de recursos humanos e infraestructura.

TSS-Transport Simulation Systems. (2010). *Microsimulator and Mesosimulator Aimsun 6.1 User's Manual.* TSS-Transport Simulation Systems. S.L.

Vieira Hallmann, H. (2011). *Comparação entre Software Simuladores de Trânsito.* Porto Alegre: Universidade federal do rio grande do Sul instituto de informática curso de ciência da computação