

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

### POSGRADO

### MAESTRÍA EN MATEMÁTICA APLICADA

---

**Tema:** “SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR EN UN TRAMO DE LA  
AV. MANUELITA SÁENZ COMPRENDIDO ENTRE LAS CALLES  
PÍO DE BAROJA Y ANTONIO CLAVIJO SECTOR PASEO  
SHOPPING AMBATO”

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de Magíster en  
Matemática Aplicada

Modalidad de Titulación Proyecto de Desarrollo

**Autor:** Lic. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla.

**Director:** Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, Ph.D.

Ambato – Ecuador

2021

## APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ingeniero Magíster, Presidente del Tribunal, e integrado por los señores: Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magíster, presidenta del tribunal, e integrado por los señores: Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos Ph.D. y Profesor Saba Rafael Infante Quirpa Ph.D., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el trabajo de Investigación con el tema: “SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR EN UN TRAMO DE LA AV. MANUELA SÁENZ COMPRENDIDO ENTRE LAS CALLES PÍO DE BAROJA Y ANTONIO CLAVIJO SECTOR PASEO SHOPPING AMBATO”, elaborado y presentado por el Señor Ingeniero Ángel Gustavo Moyolema Chaglla, para optar por el Grado Académico de Magister en Matemática Aplicada; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

-----  
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.  
Presidenta y Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos Ph.D.  
Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Prof. Saba Rafael Infante Quirpa Ph.D.  
Miembro del Tribunal de Defensa

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

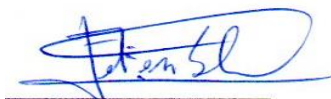
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación con el tema: “SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR EN UN TRAMO DE LA AV. MANUELITA SÁENZ COMPRENDIDO ENTRE LAS CALLES PÍO DE BAROJA Y ANTONIO CLAVIJO SECTOR PASEO SHOPPING AMBATO”, le corresponde exclusivamente al: Ing. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla, autor bajo la Dirección del Ing. Rubén Nogales Mg., Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



---

Lic. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla  
c.c. 180332363-1

**AUTOR**



---

Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, Ph.D.  
c.c. 170801926-8

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.



---

Lic. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla  
c.c. 180332363-1

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
AGRADECIMIENTO .....	xiii
DEDICATORIA .....	xiv
RESUMEN EJECUTIVO .....	xv
ABSTRACT.....	xvi

### 1. CAPÍTULO I

#### EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1 General .....	3
1.3.2 Específicos .....	3

### 2. CAPÍTULO II

#### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1 Estado del arte .....	5
2.1.1 Antecedentes .....	5
2.1.2 Modelos macroscópicos vs microscópicos .....	7
2.1.3 Métodos de análisis de tráfico .....	8
2.1.4 Flujo de tráfico de vehículos .....	9
2.1.5 Modelo de tráfico de Lighthill-Whitham-Richards.....	14
2.1.6 Regresión lineal.....	15
2.1.7 Error del modelo.....	16
2.1.8 Teoría de colas .....	17

2.1.9	Simulación de tráfico .....	18
-------	-----------------------------	----

### **3. CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

3.1	Ubicación .....	24
3.2	Equipos y materiales .....	24
3.3	Tipo de investigación .....	25
3.4	Prueba de Hipótesis .....	25
3.4.1	Hipótesis Nula $H_0$ .....	25
3.4.2	Hipótesis Alterna $H_1$ .....	25
3.5	Población y muestra .....	26
3.6	Recolección de información.....	27
3.7	Procesamiento de la información y análisis estadístico .....	31
3.8	Variables respuesta o resultados alcanzados .....	32

### **4. CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Análisis descriptivo .....	34
4.1.1	Flujo de tráfico vehicular .....	34
4.1.2	Densidad de tráfico.....	46
4.1.3	Velocidad .....	49
4.1.4	Tiempos de semaforización.....	51
4.1.5	Relación de la densidad, velocidad y flujo.....	52
4.1.6	Relación densidad de tráfico y velocidad.....	60
4.2	Análisis de resultados .....	66
4.2.1	Simulación del modelo LWR con la función teórica de Greenshields .....	66
4.2.2	Simulación del modelo LWR con la función real a partir de regresión lineal.....	78
4.2.3	Simulación del flujo de tráfico .....	90
4.3	Discusión .....	93

### **5. CAPÍTULO V**

5.1	Conclusiones .....	96
5.2	Recomendaciones .....	97
	Glosario.....	99

Bibliografía .....	100
Anexos .....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1.</b> Principales características de softwares para manejo de datos.....	22
<b>Tabla 3-1.</b> Equipos y materiales utilizados.....	24
<b>Tabla 3-2.</b> Muestreo por día y hora.....	26
<b>Tabla 3-3.</b> Subtramos de la vía delimitados por las intersecciones.....	28
<b>Tabla 3-4.</b> Denominación de los semáforos.....	29
<b>Tabla 3-5.</b> Variables respuesta o resultados alcanzados.....	33
<b>Tabla 4-1.</b> Flujo de tráfico a la entrada al sistema para vehículos livianos.....	42
<b>Tabla 4-2.</b> Flujo de tráfico a la entrada al sistema para vehículos pesados.....	43
<b>Tabla 4-3.</b> Flujo de tráfico en el interior del sistema para vehículos livianos y pesados.....	43
<b>Tabla 4-4.</b> Flujo promedio de vehículos livianos según el día y la hora, subtramo AB.....	47
<b>Tabla 4-5.</b> Flujo promedio de vehículos livianos según el día y la hora, subtramo AB.....	49
<b>Tabla 4-6.</b> Función lineal de $v(\rho)$ .....	61
<b>Tabla 4-7.</b> Parámetros del modelo de regresión de $v(\rho)$ en el subtramo AB.....	62
<b>Tabla 4-8.</b> Tabla ANOVA del modelo de regresión de $v(\rho)$ en el subtramo AB.....	62
<b>Tabla 4-9.</b> Parámetros del modelo de regresión de $v(\rho)$ en el subtramo BC.....	63
<b>Tabla 4-10.</b> Parámetros del modelo de regresión de $v(\rho)$ en el subtramo CB.....	64
<b>Tabla 4-11.</b> Parámetros del modelo de regresión de $v(\rho)$ en el subtramo BA.....	65
<b>Tabla 4-12.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo AB.....	66
<b>Tabla 4-13.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BC.....	72
<b>Tabla 4-14.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo CB.....	74
<b>Tabla 4-15.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BA.....	76
<b>Tabla 4-16.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo AB.....	78
<b>Tabla 4-17.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BC.....	84
<b>Tabla 4-18.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo CB.....	86
<b>Tabla 4-19.</b> Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BA.....	88
<b>Tabla 4-20.</b> Parámetros para la simulación del flujo de tráfico.....	90
<b>Tabla 4-21.</b> Características de los modelos para el análisis del flujo de tráfico.....	94



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2-1.</b> Derivación de la velocidad media espacial.....	10
<b>Figura 2-2.</b> Densidad de tráfico durante un periodo de luz roja activada.....	13
<b>Figura 2-3.</b> Densidad de tráfico durante un periodo de luz roja activada.....	13
<b>Figura 2-4.</b> Modelo continuo para la densidad de tráfico inicial.....	14
<b>Figura 2-5.</b> Modelo del flujo vehicular con intersecciones.....	18
<b>Figura 2-6.</b> Red de colas en serie FFQNs.....	18
<b>Figura 3-1.</b> Semaforización en la intersección de la av. Manuelita Sáenz y Pío Baroja.....	28
<b>Figura 3-2.</b> Semaforización en la intersección de la av. Manuelita Sáenz y A. Clavijo.....	29
<b>Figura 3-3.</b> Puntos de medición en intersección A, av. Manuelita Sáenz y Pío de Baroja.....	30
<b>Figura 3-4.</b> Puntos de medición en intersección B, av. Manuelita Sáenz y Miguel Delibes.....	30
<b>Figura 3-5.</b> Puntos de medición en la intersección C de la av. Manuelita Sáenz y Antonio Clavijo.....	31
<b>Figura 4-1.</b> Programación de la probabilidad de los flujos de salida observados.....	91
<b>Figura 4-2.</b> Programación de la generación de datos aleatorios del flujo de vehículos que ingresan al sistema.....	92
<b>Figura 4-3.</b> Programación de los flujos de vehículos que salen del sistema.....	92
<b>Figura 4-4.</b> Flujo de vehículos a la salida del sistema en una simulación aleatoria.....	93

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 4-1.</b> Flujos de tráfico del subtramo AB según la hora del día.....	44
<b>Gráfico 4-2.</b> Flujos de tráfico del subtramo BC según la hora del día.....	45
<b>Gráfico 4-3.</b> Flujos de tráfico del subtramo CB según la hora del día.....	45
<b>Gráfico 4-4.</b> Flujos de tráfico del subtramo BA según la hora del día.....	46
<b>Gráfico 4-5.</b> Densidades de tráfico por subtramo según la hora del día.....	48
<b>Gráfico 4-6.</b> Velocidades por subtramo según la hora del día.....	51
<b>Gráfico 4-7.</b> Tiempos de semaforización en la intersección A.....	51
<b>Gráfico 4-8.</b> Tiempos de semaforización en la intersección C.....	52
<b>Gráfico 4-9.</b> Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo AB.....	61
<b>Gráfico 4-10.</b> Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo BC.....	63
<b>Gráfico 4-11.</b> Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo CB.....	64
<b>Gráfico 4-12.</b> Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo BA.....	65
<b>Gráfico 4-13.</b> Simulación de las densidades de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.....	68
<b>Gráfico 4-14.</b> Simulación de las densidades de tráfico vs flujo, evento 92 subtramo AB.....	68
<b>Gráfico 4-15.</b> Simulación de los flujos de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.....	69
<b>Gráfico 4-16.</b> Simulación del flujo $q_5$ de vehículos en una hora, subtramo AB.....	70
<b>Gráfico 4-17.</b> Densidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB...	70
<b>Gráfico 4-18.</b> Velocidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB...	71
<b>Gráfico 4-19.</b> Flujos de tráfico medios por evento en una hora, subtramo AB.....	71
<b>Gráfico 4-20.</b> Simulación del flujo $q_{13}$ de vehículos en una hora, subtramo BC.....	73
<b>Gráfico 4-21.</b> Simulación del flujo $q_{14}$ de vehículos en una hora, subtramo CB.....	75
<b>Gráfico 4-22.</b> Simulación del flujo $q_6$ de vehículos en una hora, subtramo BA.....	77
<b>Gráfico 4-23.</b> Simulación de las densidades de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.....	80

<b>Gráfico 4-24.</b> Simulación de las densidades de tráfico vs flujo, evento 92 subtramo AB.....	81
<b>Gráfico 4-25.</b> Simulación de los flujos de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.....	81
<b>Gráfico 4-26.</b> Simulación del flujo $q_5$ de vehículos en una hora, subtramo AB.....	82
<b>Gráfico 4-27.</b> Densidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB....	82
<b>Gráfico 4-28.</b> Velocidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB...	83
<b>Gráfico 4-29.</b> Flujos de tráfico medios por evento en una hora, subtramo AB.....	83
<b>Gráfico 4-30.</b> Simulación del flujo $q_{13}$ de vehículos en una hora, subtramo BC.....	85
<b>Gráfico 4-31.</b> Simulación del flujo $q_{14}$ de vehículos en una hora, subtramo CB.....	87
<b>Gráfico 4-32.</b> Simulación del flujo $q_6$ de vehículos en una hora, subtramo BA.....	89

## ÍNDICE DE ANEXOS

**Anexo A.** Zona de estudio. Tramo de la Avenida Manuelita Sáenz entre Pío Baroja y Antonio Clavijo.

**Anexo B.** Recolección de datos de la zona de estudio.

**Anexo C.** Código del Script en MATLAB versión R2018a.

**Anexo D.** Ejecución del script de la regresión lineal de la velocidad en función de la densidad de tráfico en MATLAB versión R2018a.

**Anexo E.** Ejecución del script de la simulación del tráfico vehicular a través del modelo macroscópico LWR en MATLAB versión R2018a.

**Anexo F.** Ejecución del script de la simulación del flujo vehicular con base en la probabilidad de ocurrencia de las entradas y salidas del sistema en MATLAB versión R2018a.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme la vida, cuidarme y sustentarme en todo tiempo.

A mi madre, quién en vida fue Rosario Chaglla y a mis hermanos Ernesto, Luzmila, Carlos y Gonzalo, quienes han sido ejemplo de tenacidad y lucha incansable para alcanzar metas y sueños.

Al Ing. Fabián Salazar, PhD., como director de tesis. Gracias por sus correcciones, sugerencias, palabras de ánimo y sabias enseñanzas que han servido de gran soporte para desarrollar y culminar con éxito el presente trabajo de investigación.

A mis compañeros de estudio, en especial quienes a pesar de no ser mi familia supieron brindarme su amistad, respeto y apoyo incondicional en el momento propicio.

Al Gobierno Autónomo Descentralizado – Municipalidad de Ambato (GAD-MA) por el apoyo brindado y por facilitar la información básica de la zona vehicular, objeto del presente estudio, a través de la Dirección de Tránsito, Transporte y Movilidad.

A la Universidad Técnica de Ambato por concederme la gran oportunidad de estudiar la Maestría en Matemática Aplicada, así también por su aprobación para desarrollar el presente trabajo investigativo.

**Angel Moyolema**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de investigación dedico con todo cariño a mi familia y de manera especial a mi hijo Israel quien ha sido, es y será mi motor, mi motivación para avanzar hacia adelante y triunfar en la vida.

**Angel Moyolema**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN MATEMÁTICA APLICADA**

**TEMA:**

Simulación de tráfico vehicular en un tramo de la Av. Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío de Baroja y Antonio Clavijo sector Paseo Shopping Ambato.

**AUTOR:** Lic. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla, Licenciado en Ciencias de la Educación mención Físico Matemáticas.

**DIRECTOR:** Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, Ph.D.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

- Tecnología de la Información y Sistemas de Control.

**FECHA:** 28 de enero de 2021.

**RESUMEN EJECUTIVO**

La investigación tiene por objeto realizar una simulación de tráfico vehicular mediante el uso de software libre y un modelo macroscópico, para optimizar el flujo vehicular en el tramo de la Avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío de Baroja y Antonio Clavijo, sector Paseo Shopping Ambato. El estudio inició con una fase de campo destinada a la recolección de datos de densidades de tráfico, velocidades medias de circulación y flujos de tráfico en cada uno de los cuatro subtramos que comprende el sistema vial de interés, en diferentes días y horarios. Posteriormente se desarrolló una fase de procesamiento y análisis de datos, que tiene por fin presentar los estadísticos descriptivos para la identificación de valores mínimos, promedios y máximos de cada parámetro. La tercera fase consistió en la aplicación del modelo de tráfico macroscópico Lighthill-Whitham-Richards (LWR), resuelto mediante una técnica de solución numérica, con las condiciones de frontera y la incorporación de funciones lineales que expresan la relación de velocidad y la densidad de tráfico, éste último se obtuvo mediante modelos de regresión. Entre los resultados del estudio se destaca que se presentan los mayores flujos a las 18:30 horas en todo el tramo. El flujo de tráfico más elevado de los registrados fue de 1140 vehículos/h, para los vehículos que ingresan desde la av. Manuelita Sáenz, sentido Norte-Sur hacia la intersección A. Las densidades de tráfico fueron similares para los cuatro subtramos, siendo el pico máximo alcanzado de 16 autos por subtramo. Aunque el tramo que presenta la mayor fluctuación de velocidad y densidad de tráfico es el BA, lo que denota que es el más conflictivo, dado que restringe el libre flujo de autos de forma más recurrente. Se efectuaron N simulaciones en un lapso de una hora, tomando en cuenta los tiempos de semaforización, cada simulación representa un evento y al final se contabilizaron los autos que circularían en ese tiempo.

**Descriptor:** Densidad de tráfico, flujo de tráfico, función Greenshields, modelo LWR, posición, regresión, simulación, subtramo, tiempo, velocidad.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN MATEMÁTICA APLICADA**

**THEME:**

Simulation of vehicular traffic in a section of Manuelita Sáenz Avenue between Pío de Baroja and Antonio Clavijo streets at the Paseo Shopping Ambato.

**AUTHOR:** Lic. Ángel Gustavo Moyolema Chaglla, Licenciado en Ciencias de la Educación mención Físico Matemáticas.

**DIRECTED BY:** Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, Ph.D.

**LINE OF RESEARCH:**

- Tecnología de la Información y Sistemas de Control.

**DATE:** January 28<sup>th</sup>, 2021.

**ABSTRACT**

The objective of the research is to carry out a simulation of vehicular traffic through the use of free software and a macroscopic model, to optimize the vehicular flow in the section of Avenida Manuelita Sáenz between Pío de Baroja and Antonio Clavijo streets, Paseo Shopping Ambato. The study began with a field phase aimed at collecting data on traffic densities, average traffic speeds and traffic flows in each of the four sub-sections that comprise the road system of interest, on different days and times. Subsequently, a data processing and analysis phase was developed, which aims to present descriptive statistics for the identification of minimum, average and maximum values of each parameter. The third phase consisted in the application of the macroscopic traffic model Lighthill-Whitham-Richards (LWR), solved by means of a numerical solution technique, with the boundary conditions and the incorporation of linear functions that express the speed relationship and the density of traffic, the latter was obtained using regression models. Among the results of the study, it stands out that the highest flows are presented at 6:30 p.m. throughout the section. The highest traffic flow of those registered was 1140 vehicles per hour, for vehicles entering from Av. Manuelita Sáenz, north-south direction towards intersection A. Traffic densities were similar for the four sub-sections, the maximum peak reached being 16 cars per sub-section. Although the section that presents the greatest fluctuation in speed and traffic density is the BA, which denotes that it is the most conflictive, since it restricts the free flow of cars on a more recurrent basis. N simulations were carried out in a period of one hour, taking into account the traffic light times, each simulation represents an event and in the end the cars that would circulate in that time were counted.

**Keywords:** Greenshields' function, LWR model, position, regression, road sub-section, simulation, speed, time, traffic density, traffic flow.



# 1. CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

El presente trabajo corresponde a una simulación de tráfico vehicular en un tramo de la avenida Manuelita Sáenz comprendido entre la calle Pío de Baroja y la calle Antonio Clavijo, en el sector del Paseo Shopping Ambato. A partir de la apertura del mencionado centro comercial en agosto del año 2019, el tráfico vehicular ha crecido de forma notoria, a esto se suma el funcionamiento de instituciones como la sucursal sur del Servicio de Rentas Internas y la Universidad Tecnológica Indoamérica. Por este motivo la Dirección de Tránsito, Transporte y Movilidad del Municipio de Ambato instaló un sistema de semaforización para la gestión del tráfico vehicular y peatonal en la zona. Sin embargo, hasta el momento no existe un estudio técnico que evalúe la eficiencia del sistema de semaforización, la evolución del flujo de tráfico y que determine los distintos escenarios que se presentan en función de la hora del día.

Desde la Dirección de Tránsito, Transporte y Movilidad del Municipio de Ambato se reconoce que a nivel general en la ciudad existen problemas puntuales como la congestión de tráfico y la presencia de accidentes, los cuales cada vez se van acrecentando con el incremento progresivo del parque automotor, sumado al hecho que la topografía de la ciudad ha dificultado la posibilidad de contar con alternativas de mejoramiento de la conectividad vial urbana (Dirección de Tránsito del Municipio de Ambato, 2015, p. 5). Esta situación no es ajena a las vías aledañas al Paseo Shopping Ambato, aunque actualmente se desconocen con exactitud los niveles de flujo de tráfico.

Como una alternativa que permita brindar información técnica sobre el comportamiento del tráfico vehicular en el sector del Paseo Shopping Ambato, se plantea la realización de la simulación tráfico, basándose en estudios de Modelado Macroscópico, usando como herramienta un software libre, el mismo que permite la simulación con información obtenida experimentalmente en las intersecciones que contempla la zona de estudio. Para el efecto, en primer término se recopilaron datos

del flujo de tráfico en las intersecciones viales del tramo de la avenida Manuelita Sáenz comprendido entre la calle Pío de Baroja y la calle Antonio Clavijo, cuya recolección de la información se llevó a cabo entre septiembre y octubre de 2020. En este sentido, se aclara que existe un sesgo en los datos, debido a que el flujo de tráfico vehicular se vio influenciado por las restricciones impuestas como parte de la campaña “Yo me cuido” impulsada por el gobierno para prevenir la propagación del virus SARS-CoV-2, que limita la movilidad de personas y vehículos en las condiciones normales, particularmente en referencia a la inasistencia en forma presencial a las instituciones educativas y la necesidad del mantener el distanciamiento social.

De esta manera, mediante manipulación de las variables inherentes al tráfico vehicular, tales como velocidad y [densidad](#) de tráfico, se plantea la modelación de los escenarios que describen la variable dependiente, que es el flujo vehicular, a fin de optimizar los ciclos de funcionamiento de los semáforos.

## **1.2. Justificación**

La ciudad de Ambato, caracterizada por ser eminentemente productiva y comercial, con el paso de los años ha tenido un importante crecimiento de su población y por consiguiente un aumento del tráfico vehicular. En la actualidad, de manera especial en la Avenida Manuelita Sáenz debido a la presencia del Paseo Shopping, se ha llegado a notar la falta de una infraestructura adecuada que soporte el creciente número de vehículos en esta zona, sumado a las condiciones topográficas que se caracterizan por la presencia de pronunciadas pendientes que dificultaron e impidieron la creación de avenidas transversales a la Manuelita Sáenz. Esta situación da lugar a que en horas pico, especialmente en feriados, el tráfico vehicular sea extremadamente denso y difícil de poder ser descongestionado, repercutiendo en la dificultad de movilidad urbana, lo que a su vez ocasiona malestar en la ciudadanía.

Por lo antes mencionado, resulta de vital importancia desarrollar el Proyecto de Simulación de tráfico en la Avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío de Baroja y Antonio Clavijo, como una medida conveniente para que la Dirección de Tránsito del GAD Municipalidad de Ambato disponga de información técnica de los distintos escenarios de flujo vehicular en el sector.

El proyecto en sí, va encaminado a aportar una mejora importante del flujo vehicular, vista la alta congestión que se ha producido desde la inauguración del Paseo Shopping Ambato. Los resultados de la simulación podrán ser avalados por la Dirección de Tránsito, Transporte y Movilidad y permitirán que desde la mencionada institución se adopten medidas para optimizar los ciclos de trabajo en los semáforos de la zona de investigación, así como también servirán de referente para tomar decisiones en beneficio de lo que hoy se ha convertido en un importante sector comercial de nuestra ciudad. De manera que la presente investigación es de relevancia social, que podrá beneficiar a la ciudadanía de Ambato, que demanda de una eficiente gestión de la movilidad urbana.

Paralelamente la investigación tiene una utilidad teórica y metodológica, en vista de que se propone el desarrollo de una simulación del tráfico vehicular, con base en la aplicación de los principios de la Matemática Aplicada. De manera que se contribuye a la valoración de la potencial aportación de la ciencia en la solución de problemas reales y de interés colectivo.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1 General**

Realizar una simulación de tráfico vehicular mediante el uso de software y un modelo macroscópico, que permita optimizar el flujo vehicular, a fin de reducir la congestión vehicular en el tramo de la Avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío de Baroja y Antonio Clavijo, sector Paseo Shopping Ambato.

#### **1.3.2 Específicos**

- Estudiar el tráfico vehicular considerando la llegada y salida de vehículos al entorno o sistema de estudio, la densidad y la congestión que se genera.
- Analizar el flujo vehicular utilizando una herramienta de software, que represente distintos escenarios, a partir de la modificación de los parámetros inmersos en el sistema.

- Proponer un modelo macroscópico de simulación de tráfico, que permita optimizar el flujo vehicular en el tramo de estudio y en entornos viales con características similares.

## 2. CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

#### 2.1 Estado del arte

##### 2.1.1 Antecedentes

Gómez (2009) implementó un simulador de flujo vehicular con base en la aplicación de un método que permite la sincronización de un circuito de calles. El método de sincronización se llevó a cabo por medio de la adopción de varias teorías tales como: ecuaciones diferenciales parciales, teoría de colas, teorías de ondas, ondas de Shock. A partir de la conjunción de dichas teorías obtuvo el tiempo de duración que debe de tener cada ciclo de los semáforos del circuito de calles. Para determinar los tiempos que deben transcurrir entre el inicio del ciclo verde de un semáforo y del semáforo siguiente aplicó el concepto de offset. En este modelo los tiempos de llegada de los autos fueron generados mediante una distribución exponencial. El simulador vehicular obtenido tiene la capacidad de representar las situaciones reales con una diferencia menor a un auto.

Torres-Vega (2012) desarrolló una simulación del tráfico en un sistema vial y efectuó un análisis estadístico de los resultados. La simulación permite obtener información de los principales aspectos requeridos en el modelado de un sistema básico de control del tráfico para simularlo y observar su comportamiento. Dichos aspectos son entre otros los siguientes: ritmo de arribos, tiempo de recorrido y velocidades, monitoreo del tráfico, predicción de congestionamientos, evaluación de medidas para controlar el exceso de velocidad y evaluación del funcionamiento de semáforos en intersecciones. Los aspectos a tener en cuenta para la evaluación del experimento de simulación son: el tiempo de duración, el número de réplicas, el [período de calentamiento](#) e indicadores estadísticos de la distribución de los datos (prueba de normalidad, técnicas de reducción de varianza) (pp. 45-78).

Ayala (2012) realizó una simulación de tráfico en el tramo de la avenida Interoceánica comprendido entre la calle González Suarez y Francisco Pizarro, en la ciudad de Quito. Para la simulación se consideraron los datos recolectados durante las horas de mayor afluencia de vehículos en la mañana, se obtuvieron volúmenes de tráfico, distribuciones de llegada, parámetros de teoría de colas, rutas dominantes, etc, haciendo uso de la interfaz Netlogo. El modelo simulado permite modificar los tiempos de los semáforos y observar posibles cambios en parámetros, tales como el número de autos detenidos, el tiempo de viaje y de espera. De esta manera se establecieron 4 escenarios y el escenario real. Mediante la simulación la autora determinó que el flujo vehicular puede optimizarse a través de la manipulación de los ciclos de semaforización y de su sincronización.

Aldás-Sánchez (2015) estableció un modelo para la expansión de la capacidad de tráfico en el casco urbano de la ciudad de Ambato, a partir de las mediciones de volúmenes de tráfico. El modelo utilizado es de tipo estocástico basado en flujos O-D, que posibilita la simulación del tráfico en diferentes condiciones y según varios tipos de intervenciones. Para el efecto se determinaron las principales zonas de congestión de flujo vehicular, se modeló el problema mediante una matriz origen-destino O-D, que conlleva un conjunto de ecuaciones de la forma matricial  $Y=AX$ , siendo Y el tráfico en las vías, A la matriz de enlaces y rutas y X el flujo vehicular; la incógnita es la variable X. Para la solución se empleó un método basado en Algoritmo Genérico (AG), que implica la transformación del problema de estimación de la matriz O-D a un problema de optimización, con una función de costo bajo determinadas restricciones.

Campoverde (2017) desarrolló el modelado de tráfico vehicular en varias avenidas tomando los datos estadísticos obtenidos en la ciudad de Cuenca. Para el modelado y control de sistema de flujo vehicular el autor aplicó los principios de la lógica difusa, que es una rama de la inteligencia artificial. De esta manera, encontró un modelo que fue capaz de predecir dos muestras de datos en el futuro, con el apoyo del software MATLAB. Adicionalmente obtuvo un modelo predictivo de una intersección semafórica y que proporciona información de gráficas del modelo del sistema, errores de comprobación, errores de entrenamiento y desviaciones entre los datos de entrada y datos del modelo obtenido.

En la conferencia Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control, los autores Cao & Luo (2019) publicaron un método para integrar VISSIM (un sistema de simulación de flujo de tráfico microscópico) y MATLAB, para crear una plataforma de simulación mediante una tecnología de interface COM. La integración permite dar solución al problema de la simulación difícil y lenta del control de coordinación de señales de tráfico. La fiabilidad de la plataforma de simulación es verificada mediante análisis y comparación de los resultados de la simulación empleando diferentes modelos de retraso de tráfico.

### 2.1.2 Modelos macroscópicos vs microscópicos

El problema de la modelación del tráfico vehicular se puede abordar desde algunos enfoques particulares. Los simuladores de tráfico pueden ser microscópicos o macroscópicos según el nivel de detalle requerido.

El enfoque macroscópico es caracterizado por variables de tipo colectivo, por lo que los vehículos son indistinguibles, se proyectan solamente cantidades promediadas. Por esta razón se requiere que se tenga bajo consideración un gran número de vehículos en circulación. Las principales ventajas de los modelos macroscópicos son entre otras que, los resultados son cualitativamente cercanos al comportamiento real, existe una buena capacidad de análisis de las ecuaciones establecidas y son computacionalmente más eficientes que los microscópicos. El número de variables involucradas (*densidad*, *velocidad promedio*, *varianza*) desempeña un rol fundamental en el nivel de detalle de la descripción del fenómeno (Ramírez-Rabelo, 2019, pp. 5-6).

Los macroscópicos modelan el flujo de tráfico empleando modelos matemáticos de alto nivel y con simulaciones continuas. Dichos modelos consideran a todos los vehículos de la misma manera y utilizan *variables de entrada y salida, como velocidad, flujo y densidad*. Estos simuladores no tienen la capacidad de diferenciar entre vehículos individuales y no suelen adaptarse a diferentes tipos de vehículos y estilos de conducción. Además carecen de la capacidad de modelar carreteras complejas, funciones de control de tráfico detalladas o diferentes comportamientos de los conductores. Los simuladores macroscópicos son más útiles y precisos para la simulación de sistemas de tráfico de área extensa, que no requieren modelos

detallados, como las redes de autopistas y de carreteras periféricas y no se adaptan muy bien a los modelos urbanos (Bazghandi, 2012, p. 116).

Por otra parte, el enfoque microscópico se basa en la asignación de una ecuación de movimiento a cada uno de los vehículos y a partir de esto se estudia su movimiento a la largo de una vía. Este enfoque se centra en el planteamiento de reglas de movimiento de cada automóvil respecto al resto, con el fin de obtener la dinámica para el tránsito (Ramírez-Rabelo, 2019, pp. 5-6).

Los simuladores microscópicos modelan entidades individuales por separado con un alto nivel de detalle y se clasifican como simulaciones discretas. Se realiza un seguimiento de cada vehículo mientras interactúa con otros vehículos y el medio ambiente. Las interacciones generalmente se rigen por la lógica de seguimiento de automóviles y de cambiarse de carril. Se definen reglas y regulaciones para controlar lo que se puede y no se puede hacer en la simulación, por ejemplo, *límites de velocidad, derechos de paso, velocidad del vehículo y aceleración*. Los simuladores microscópicos pueden modelar el flujo de tráfico de manera más realista que los simuladores macroscópicos, debido al detalle adicional agregado en el modelado de vehículos individualmente (Bazghandi, 2012, p. 116).

### **2.1.3 Métodos de análisis de tráfico**

Existen varios métodos de modelado para el análisis de tráfico en una zona urbana. En este sentido, los métodos de imputación, están basados en el modelo beta binomial y en ecuaciones de equilibrio de flujo, se emplea cuando es necesario disponer de datos en todos los arcos de una red vial. También existe el análisis de correlaciones para depuración y corrección de datos. Por su parte los métodos de análisis de componentes principales están dirigidos a identificar las zonas más conflictivas de tráfico, con mira a colocar dispositivos de conteo de vehículos, personas, etc. Los modelos dinámicos lineales polinómicos de orden 2, se emplean para predicción a corto plazo de la saturación en puntos de la red. Adicionalmente se puede señalar a los modelos de predicción, basados en series temporales, descomposición modal y matrices origen-destino (OD) dinámicas. Por último se destaca a los modelos estocásticos genéricos de predicción de flujo. En cuanto a los métodos de simulación se tienen al método Monte



Carlo, mediante el muestreo de variables aleatorias; la simulación continua a través de la resolución de ecuaciones diferenciales y la simulación por eventos discretos (Pílamunga Poveda, 2015).

#### **2.1.4 Flujo de tráfico de vehículos**

La dinámica del flujo de tráfico vehicular incluye rangos de escala de tiempo, que puede ir desde segundos hasta pocas horas. El avance de los vehículos es una medida fundamental tanto en la teoría del flujo de tráfico como en las aplicaciones de transporte. Por lo general, el avance se define como el tiempo entre dos vehículos sucesivos cuando pasan por el mismo punto en el mismo carril. Comúnmente, se mide a partir de la misma característica común (por ejemplo bache delantero/trasero) de ambos vehículos.

Por un lado, el avance del vehículo caracteriza la forma como se distribuyen los vehículos en una carretera. Esto hace que el avance de los vehículos esté estrechamente relacionado con la importante medida de tráfico macroscópica, denominada la tasa de flujo de tráfico. Por otro lado, si el tráfico no fluye libremente, el avance del vehículo también refleja cómo los conductores siguen a los vehículos que van delante. Por lo tanto, los datos de avance de los vehículos a menudo describen simultáneamente parámetros macroscópicos de flujo de tráfico y el comportamiento microscópico de seguimiento de vehículos de los conductores (Li & Chen, 2017, p. 171).

Las magnitudes que generalmente son consideradas en la modelación y simulación del tráfico vehicular son las que se describen a continuación:

##### **2.1.4.1 Flujo de tráfico**

El flujo de tráfico  $q$  se define como el número de vehículos  $\Delta N$  que atraviesan una sección transversal en una ubicación  $x$  dentro de un intervalo de tiempo  $\Delta t$ :

$$q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (1)$$

Las unidades de medición de esta magnitud, generalmente son en vehículos por hora (veh/h) o en vehículos por minuto (veh/min) (Treiber & Kesting, 2013, p. 15).

#### 2.1.4.2 Densidad de tráfico

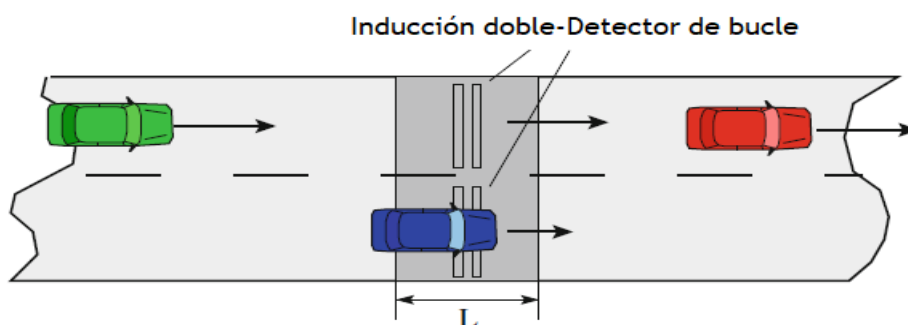
La densidad de tráfico  $\rho(x, t)$  es una magnitud que se define mediante la utilización de la relación del flujo de tráfico respecto a la velocidad espacial media de los vehículos  $v(x, t)$  y se denota por medio de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{q(x, t)}{v(x, t)} \quad (2)$$

Se puede obtener una mejor estimación de la densidad de tráfico, a partir de la definición “vehículos por distancia”, que se puede expresar en términos de cantidades microscópicas, como la inversa de la media espacial de las distancias de avance. Las unidades en las que se suele medir la densidad de tráfico son en vehículos por kilómetro (veh/km) o vehículos por metro (veh/m) (Treiber & Kesting, 2013, pp. 17-18).

#### 2.1.4.3 Velocidad media espacial

La velocidad media espacial (media instantánea)  $v(t)$  es la media aritmética de la velocidad de todos los vehículos dentro de un segmento de carretera dado en un tiempo  $t$ . En la Figura 2-1, se representa un segmento de longitud  $L$  alrededor del detector, La velocidad media armónica del tiempo es aproximadamente igual a la velocidad media espacial (Treiber & Kesting, 2013, pp. 21-22).



**Figura 2-1.** Derivación de la velocidad media espacial.  
Fuente: Treiber & Kesting (2013).

$$v(t) = \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} v_i(t) \quad (3)$$

Siendo  $n(t)$  el número de vehículos en el tramo de carretera referenciado.

#### 2.1.4.4 Relación densidad-velocidad

Es posible establecer una relación entre la densidad de tráfico y la velocidad de los vehículos. Experimentalmente se demuestra que la velocidad media es menor cuando el tráfico es más denso. Además, el diagrama refleja el comportamiento medio de una unidad conductor-vehículo (típica) en diferentes densidades e influencias externas como límites de velocidad, condiciones meteorológicas, etc. Por su parte, en un tráfico de muy baja densidad, los conductores no suelen estar influenciados por los otros vehículos y se tiene una velocidad libre media. En este caso, existen pocas interacciones entre los conductores y se puede esperar que la mayoría de los conductores conduzcan a la velocidad deseada. Las distribuciones de velocidades en el carril izquierdo y medio son simétricas y aproximadamente [gaussianas](#), mientras que las velocidades en el carril derecho se distribuyen bimodalmente, mostrando la superposición de las diferentes distribuciones de velocidad de camiones y turismos.

#### 2.1.4.5 Diagrama densidad-flujo

Mediante un gráfico de dispersión de puntos entre la densidad de tráfico y el flujo se puede hacer una serie de afirmaciones sobre el comportamiento macroscópico (es decir, promedio) de una unidad conductor-vehículo. En su forma idealizada, existiría un equilibrio en estado estacionario de unidades idénticas de conductor y vehículo, también se le llama diagrama fundamental. Se pueden derivar las siguientes cantidades del diagrama fundamental:

- La velocidad deseada es igual al gradiente asintótico  $q'(0)$  del ajuste  $q(\rho)$  para  $\rho = 0$ . Esta cantidad se puede determinar con mayor precisión utilizando diagramas de densidad-velocidad.
- La velocidad media real para una densidad definida está dada por la pendiente  $q(\rho)/\rho$  de la secante a través de  $(0, 0)$  y  $(\rho, q(\rho))$ .

- El valor máximo de  $q(\rho)$  es la capacidad de la vía por carril.
- La inversa de la densidad más pequeña distinta de cero  $\rho_{\max}$ , para la cual  $q(\rho_{\max}) = 0$  es igual a la longitud promedio del vehículo más la brecha promedio entre los vehículos detenidos.
- El intervalo de tiempo medio  $T$  se puede determinar a partir de la pendiente (negativa) de  $q(\rho)$  a grandes densidades.
- Las pendientes de los diagramas de densidad-flujo también permiten leer las velocidades de propagación de los frentes de atasco y las variaciones de las cantidades macroscópicas.

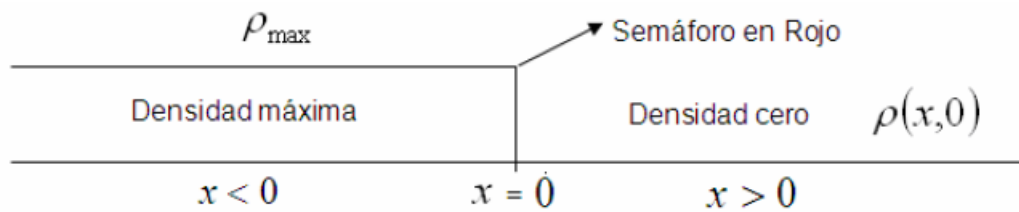
El diagrama de densidad-flujo representa datos empíricos agregados que generalmente describen el tráfico heterogéneo no estacionario, es decir, diferentes unidades de conductor-vehículo lejos del equilibrio.

#### **2.1.4.6 SemafORIZACIÓN**

En el caso de las vías urbanas, el flujo vehicular no es constante debido a la presencia de intersecciones en las avenidas y calles, lo que motiva a una alternabilidad en la circulación vehicular entre las vías perpendiculares, teniendo como parámetro de control el tiempo. Para la regulación de dicha alternabilidad se recurre a la utilización de sistemas de semaforización vehicular y peatonal, que en el caso de los autos, está constituido por tres luces (verde, amarillo y rojo) por cada semáforo, los tiempos son predeterminados y se sincronizan con los de otros semáforos para permitir que todos los vehículos que llegan a una determinada intersección puedan circular de forma alternada, dejando también la posibilidad de que transiten las personas. Esta dinámica hace que exista un determinado comportamiento de los vehículos en función de la luz del semáforo.

Con la finalidad de ilustrar la dinámica del movimiento de los vehículos en las intersecciones donde existen semáforos, se puede suponer que los autos se encuentran formados en línea recta y que se están defensa a defensa, con lo cual se tendría que  $\rho = \rho_{\max}$  para  $x < 0$  (la posición del semáforo se encuentra en  $x = 0$ ), se supone además que los autos están alineados indefinidamente y que no se hallan en movimiento. Si la luz roja es lo suficientemente prolongada, se podría suponer que no hay tráfico

adelante del semáforo, es decir que  $\rho = 0$  para  $x > 0$ . En tales circunstancias la distribución inicial de la densidad de tráfico se comportaría de la forma que se ilustra en la Figura 2-2 mostrada a continuación:



**Figura 2-2.** Densidad de tráfico durante un periodo de luz roja activada.  
Fuente: Gómez (2009).

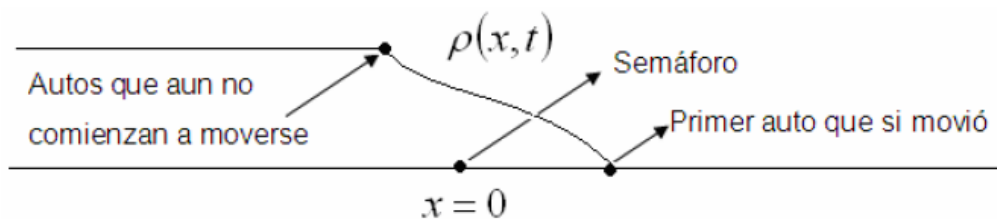
Si se supone que en un tiempo  $t = 0$  la luz del semáforo cambia de rojo a verde, se tendría la siguiente ecuación diferencial parcial para describir la conservación de los vehículos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{dq}{d\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Siendo las condiciones iniciales las siguientes:

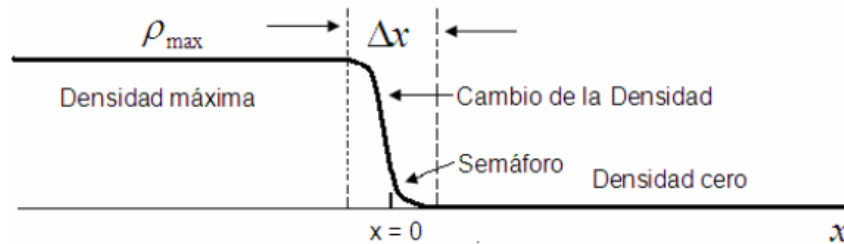
$$\rho(x, 0) = \begin{cases} \rho_{max}, & x < 0 \\ 0, & x > 0 \end{cases}$$

Se conoce que tan pronto como la luz cambia a verde, el tráfico vehicular empieza a moverse inclusive luego de que la luz cambia, por lo que se espera que la densidad se comporte de la forma que se ilustra en la Figura 2-3, en la que se puede apreciar que el tráfico es menos denso después del semáforo pasa a color verde.



**Figura 2-3.** Densidad de tráfico durante un periodo de luz roja activada.  
Fuente: Gómez (2009).

En este caso la densidad se propaga con velocidad  $dQ/d\rho$ , donde  $\rho$  permanece constante y se mueve a una velocidad constante. Entonces, para analizar el problema se debe considerar que la densidad de tráfico inicial no es discontinua, pero varía ligeramente entre  $\rho = 0$  y  $\rho = \rho_{\max}$  a lo largo de una distancia  $\Delta x$  muy pequeña, en las inmediaciones del semáforo (como se muestra en la Figura 2-4). Se espera que la solución del problema básicamente sea equivalente a la solución en el caso  $\Delta x = 0$ .



**Figura 2-4.** Modelo continuo para la densidad de tráfico inicial.  
Fuente: Gómez (2009).

### 2.1.5 Modelo de tráfico de Lighthill-Whitham-Richards

El modelo Lighthill-Whitham-Richards (LWR) corresponde a un modelo de tipo macroscópico de tráfico vehicular unidimensional, en el que se considera que ningún vehículo ingresa o sale de la carretera, lo que permite pensar que se conserva el número de vehículos. La ecuación del modelo LWR tiene como punto de partida la conservación de la masa en forma diferencial (Vasquez & Laguardia, 2018, p. 453) y se expresa como una ecuación diferencial de la forma siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_{\max} \left( 1 - \frac{2\rho}{\rho_{\max}} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Para la resolución de esta ecuación diferencial se puede recurrir a la aplicación de una aproximación numérica mediante esquemas de diferencias finitas, a partir de la sustitución de las derivadas según cada variable dependiente por cocientes en diferencias de los valores evaluados en los puntos.

Una consideración importante para la resolución del modelo LWR es que se requiere establecer una función que determine las velocidades de los vehículos a partir de los valores de la densidad de tráfico, es decir  $v(\rho)$ . Para el efecto se puede partir de ciertos

modelos teóricos existentes, tales como Greenshields, Greenberg, Underwood y Pipes-Murigel (Hernández-Vega, 2016, pp. 1-4). Estos modelos suelen expresarse como funciones lineales, logarítmica, exponenciales o polinomiales. Una alternativa viable al uso de los modelos teóricos, es la obtención de datos en campo, con la finalidad de hallar regresiones lineales o polinomiales para expresar la velocidad en función de la densidad de tráfico. El caso más simple corresponde a los modelos de regresión para hallar una función lineal que defina la velocidad en función de la densidad de tráfico.

### 2.1.6 Regresión lineal

Si se tiene una variable cuantitativa ( $x$ ) que se estima que está asociada con una determinada respuesta de interés (también cuantitativa,  $y$ ), Entonces el modelo estadístico más simple que se puede postular es:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

A este modelo se le denomina Modelo de regresión lineal simple. La denominación de “Simple” obedece a que tiene una sola variable independiente  $x$  también conocida como “regresor” y “lineal” porque la relación es lineal en los  $\beta$ 's. En la ecuación anterior existen  $n$  observaciones de la pareja ( $y, x$ ), a partir de esos datos el modelo propone dos parámetros desconocidos  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . Mientras que  $\varepsilon_i$  es un error no observable que se supone que está presente en cada una de las observaciones. Para el caso particular de la regresión lineal para estimar la velocidad a partir de la densidad de tráfico, el modelo es la forma:  $v = \beta_0 + \beta_1 \rho$ , teniendo en cuenta que  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los valores del intercepto y pendiente de la recta de regresión, respectivamente (Montgomery et al., 2012).

La validez del modelo se determina mediante una estimación de parámetros por mínimos cuadrados y máxima verosimilitud, los supuestos del modelo, los contrastes de hipótesis nulidad de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  con el estadístico F de Fisher mediante el análisis de varianza (ANOVA), además de que se pueden establecer las métricas de error, como el coeficiente de correlación.

### 2.1.7 Error del modelo

Cualquier modelo matemático o estadístico que describa el comportamiento de un fenómeno está sujeto a presentar errores de predicción o desviaciones respecto a los valores reales. Esto no quiere decir que dichos modelos sean directamente buenos o malos predictores, sino que se requiere la utilización de métricas de medición del error para establecer la validez de un modelo. Existen algunas métricas empleadas para determinar el error (Ostertagová, 2012, pp. 500-503), en el caso de los modelos de regresión se tienen las siguientes:

Coefficiente de correlación  $r$ , que es un índice que determina la proximidad de los datos a una determinada recta o curva, así como la pendiente de la misma (positiva si es hacia la derecha o negativa cuando es hacia la izquierda). El coeficiente de correlación se encuentra en el rango de  $(-1, 1)$ , mientras más se acerque a 0, representa que la recta o curva no tiene la capacidad de describir el comportamiento de los datos en un gráfico de dispersión. De la mano de  $r$ , se tiene al coeficiente de determinación  $R^2$  que se expresa como el cuadrado de  $r$ , cuyo valor oscila entre 0 y 1, cercano a 1 representa una buena capacidad de una recta o curva para expresar la relación de los datos, mientras que 0 indica que no existe correlación. La ecuación para determinar el coeficiente de determinación se expresa como sigue:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

$SST$  es la suma total de cuadrados e  $\bar{y}$  es la media aritmética de la variable  $y$ . El  $R^2$  mide la variación en la variable de respuesta  $y$  definido por la variable explicativa  $x$ . Por su parte,  $SSE$  es la suma de cuadrados de los residuos.

Otro índice comúnmente utilizado es el error cuadrático medio  $MSE$ , que es un estimador insesgado de la varianza  $\sigma^2$  del término de error aleatorio y se define mediante la expresión:

$$MSE = \frac{SSE}{df_E} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - (k + 1)} \quad (8)$$



Finalmente se destaca al Error porcentual absoluto medio o *MAPE* como una medida de precisión comúnmente utilizada en métodos cuantitativos de pronóstico. La ecuación que la expresa es la siguiente:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (9)$$

Para interpretar el MAPE se debe tener en cuenta que si es inferior al 10%, corresponde a una capacidad de pronóstico excelente del modelo; entre un 10 y 20% se tiene un buen pronóstico; entre un 20 y 50% un pronóstico aceptable y si es superior al 50% un pronóstico inexacto (Ostertagová, 2012, p. 502).

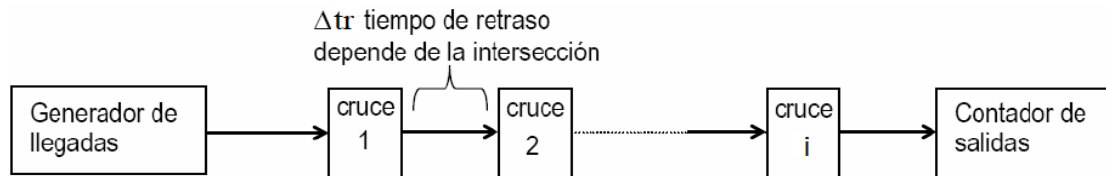
### 2.1.8 Teoría de colas

Los sistemas de colas se pueden describir como sistemas atendiendo clientes que llegan buscando un servicio, en caso de que este no pueda ser inmediatamente ofrecido, los clientes se ven obligados a esperar, mientras que la salida o abandono del sistema se hace enseguida que han sido atendidos. Este comportamiento es similar al que ocurre en las intersecciones de las vías y en los congestionamientos vehiculares. En términos generales las características básicas que se describen en un sistema de colas son los siguientes:

- Patrón de arribo o llegada.
- Patrón de servicio (tiempo de espera en un semáforo o por una congestión).
- Número de canales de servicio (divergencia o salidas).
- Capacidad del sistema (carriles).
- Disciplina de la cola.

#### 2.1.8.1 Modelación de colas para varias intersecciones

Cuando en un tramo de una vía existen varias intersecciones, se puede considerar el modelo de tramos de Erlang, el cual realiza una descomposición en una cadena de servicios conectados en serie, conforme se ilustra en la Figura 2-5:

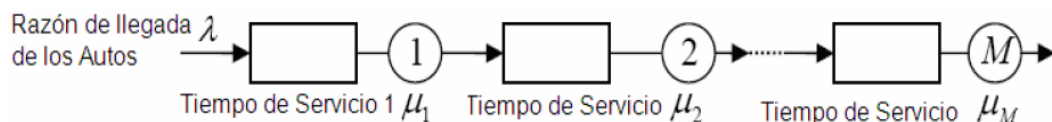


**Figura 2-5.** Modelo del flujo vehicular con intersecciones.

Fuente: Gómez (2009).

Sin embargo, en la práctica los sistemas de tráfico vehicular conforman múltiples entidades independientes que proveen el servicio de semáforos en los cruces. En estos sistemas los autos se trasladan entre las diferentes estaciones de colas, dando lugar a la formación de redes de colas, que interconectan varias estaciones (en la Figura 2-6, se ilustran las estaciones desde 1, 2,..., M). Cada una de las estaciones de colas individuales pueden ser individuales de las otras.

El análisis de las redes de colas se puede establecer de varias maneras, siendo el más usual el sistema de colas abierto Feed-Forward Queueing Networks (FFQNs), que consiste en el ordenamiento de las colas de manera que los vehículos fluyen de la cola  $i$  a la  $j$  ( $i < j$ ), conformando una red de colas cíclicas. En la Figura 2-6 se ilustra una red de colas FFQNs:



**Figura 2-6.** Red de colas en serie FFQNs.

Fuente: Gómez (2009).

### 2.1.9 Simulación de tráfico

La simulación es el proceso de representación y análisis de las condiciones reales de un fenómeno, evento o sistema real, mediante la generación aleatoria de datos con base en las condiciones naturales del problema. Para el efecto se parte de un conjunto de información previa disponible y del conocimiento de las restricciones, variables y condiciones asociadas al fenómeno o sistema a ser simulado. Para ello se utiliza un software o una aplicación que ayude al procesamiento de los datos y que presente las salidas o resultados en función de las diferentes condiciones de entrada, esto permite

conocer el efecto de los cambios realizados en el sistema de simulación. De esta manera se pueden tomar decisiones relacionadas con la adopción de medidas para mejorar las condiciones del problema, por ejemplo en el caso del tránsito vehicular, se puede optimizar los tiempos de semaforización o incorporar nuevos semáforos en una vía, también se puede justificar la creación de carriles adicionales para evitar congestiones.

Se considera que existen tres direcciones principales de análisis de los fenómenos del mundo, a saber nivel de las variables de estado, nivel paramétrico y el nivel de coeficientes (Sutherland citado por Ayala, 2012, p. 27). Antes de llevar a cabo una simulación, es preciso que se haya creado el modelo matemático, de manera que la simulación se orienta básicamente en hacer predicciones del comportamiento real del fenómeno. Entre los aspectos inherentes al proceso de modelación y simulación constan la predeterminación de la estructura del modelo, la programación, la validación del modelo, el análisis y la crítica de los resultados.

Entre las alternativas de software que se pueden utilizar para el análisis y/o simulación del flujo de tráfico, existen algunas que son de uso libre y otras bajo licencia. Las principales características de los software más utilizados para dicho propósito son las siguientes:

### **2.1.9.1 Lenguaje R**

R es un entorno de programación, análisis estadístico y software gráfico. La primera versión de R se desarrolló en el Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda) por Ross Ihaka y Robert Gentleman (Ihaka y Gentleman, 1996). Lo señalado anteriormente, junto a la fonética de R “our” que significa “nuestro”, que enlaza R con el software libre, son las razones del nombre R. Desde sus inicios, el entorno R se alimenta y crece con los trabajos de investigadores provenientes de múltiples ámbitos del conocimiento. Las aportaciones continuas y desinteresadas de funciones y paquetes de propósito general o específico perfilan a R como un entorno dinámico formado por una comunidad activa y adherida a la filosofía del software libre.

El principal entorno de desarrollo integrado en el que se puede trabajar con el lenguaje R es RStudio, el cual ofrece una interfaz gráfica conformada por una consola, una ventana para la creación de scripts, una ventana para el almacenamiento de las variables, una ventana de activación de las librerías y una para la salida de los gráficos. R integra muchos paquetes que incrementan su versatilidad y capacidad, dispone de funciones básicas relacionadas con los análisis descriptivos de datos, y de los modelos más complejos y actuales concernientes con los últimos avances en el campo de la estadística, la psicometría, la econometría o el análisis de datos en áreas como la psicología, economía, sociología, estadística, biología, enfermería, farmacia, medicina, informática, entre otros. Además de su potente capacidad de análisis estadístico, R es un es muy potente generador de gráficos. Permite componer un gráfico simple, definir figuras extremadamente complejas e incluso crear animaciones (Elosua, 2011).

### **2.1.9.2 Python**

Python fue creado por Guido van Rossum, un programador de origen holandés a finales de la década de los 80 y principio de los 90. Python es un lenguaje de programación de alto nivel interpretado, multiparadigma y multiplataforma, contiene implícitas algunas estructuras de datos como listas, diccionarios, conjuntos y tuplas, que permiten realizar algunas tareas complejas en pocas líneas de código y de manera legible. Entre las principales aplicaciones de Python destaca su uso en Big Data, AI (Inteligencia Artificial), Data Science, frameworks de pruebas y desarrollo web. Esto lo convierte en un lenguaje de propósito general de gran nivel debido a su extensa biblioteca, cuya colección ofrece una amplia gama de instalaciones. Python se gestó durante las vacaciones de Navidad de 1989, cuando el desarrollador holandés Guido van Rossum decidió escribir un intérprete para el nuevo lenguaje de scripting que venía trabajando (Challenger et al., 2014).

Python es accesible, fácil y se puede usar en varios entornos, cada vez está siendo más usado y valorado por más programadores en el mundo. Python se caracteriza por ser simple, rápido y tener una curva de aprendizaje amigable y corta. Está desarrollado bajo una licencia de código abierto, por lo que es de libre uso y distribución. A continuación, se describen las características destacables de Python:

Interpretado: significa que Python “interpreta” el código del programador, es decir, lo traduce y lo ejecuta a la vez.

Multiparadigma: porque es un lenguaje de programación que admite el uso de varios paradigmas de programación (modelos de desarrollo), por lo que no exige a los programadores un estilo único de programación. ¿Cuáles son los paradigmas de programación que permite Python? Programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional.

Multiplataforma: el lenguaje Python puede ejecutarse en diferentes sistemas operativos como Unix, Linux, macOS y Windows (Challenger et al., 2014).

### **2.1.9.3 NetLogo**

NetLogo es un programa de simulación y un entorno de desarrollo integrado para modelado basado en agentes. Enseña conceptos de programación mediante el empleo de agentes en forma de tortugas, parches, enlaces y el observador. Este programa fue diseñado para múltiples audiencias, en particular: enseñar a los niños en la comunidad educativa, y para expertos en el dominio sin experiencia en programación para modelar fenómenos relacionados. El entorno NetLogo permite la exploración de fenómenos emergentes, tiene una amplia biblioteca de modelos que incluye modelos en una variedad de dominios, tales como: Biología, Dinámica de Sistemas, Economía, Física, Psicología y Química. NetLogo permite la exploración modificando interruptores, controles deslizantes, selectores, entradas y otros elementos de la interfaz. Además NetLogo permite crear nuevos modelos y modificar los modelos existentes (Almarza, 2015).

El lenguaje de programación NetLogo es sencillo de utilizar, la mayoría de las funciones utilizadas poseen un comando específico ya creado. La simplicidad que posee permite que cualquier usuario acceda a los comandos específicos ya creados al abrir un modelo, de manera que se tiene la posibilidad de modificar e iniciar a programar desde cero, al abrir un nuevo archivo. El escenario suele ser en dos dimensiones, pero el tamaño suele ser configurable por parte del usuario (Almarza, 2015).

### 2.1.9.4 MATLAB

MATLAB es una herramienta sofisticada para cálculo numérico con aplicaciones en ingeniería. El nombre surge de la unión de las abreviaturas de **Matrix Laboratory** (laboratorio de matrices) y es considerado como un programa de alto nivel, destinado al procesamiento de números para el procesamiento de grandes volúmenes de datos. MATLAB es un software comercial, aunque también está disponible en versiones estudiantiles. Este software tiene diversas aplicaciones entre las que constan en la ingeniería eléctrica, biomédica, dinámica de fluidos, mecánica, simulación, control, entre otros (Moore, 2007).

El lenguaje de programación de MATLAB se conoce como M, en la interfaz de usuario el programa ofrece la posibilidad de trabajar en una ventana de comandos en donde se efectúan cálculos rápidos, además cuenta un editor de scripts, un espacio de trabajo donde se almacenan las variables, una ventana de registro de la historia de comandos, una ventana que muestra las carpetas y subcarpetas de los archivos utilizados. Adicionalmente el programa ofrece la posibilidad de crear archivos autoejecutables que se controlan desde una interfaz GUI y más recientemente con AppDesigner. Por su parte, Simulink, que permite crear y simular modelos de sistemas físicos y de control, a través del uso de un lenguaje de programación simbólico con el empleo de diagramas de bloques (Mikhailov, 2017).

A continuación, se muestra una tabla comparativa de las principales características de los softwares antes descritos:

**Tabla 2-1.** Principales características de softwares para manejo de datos.

Aspecto	Software			
	R	Python	NetLogo	MATLAB
Tipo de licencia	Libre	Libre	Libre	Propietario
Uso	Estadística. Ciencia de datos.	Ciencia de datos. Aplicaciones web. Machine Learning.	Simulación de fenómenos físicos.	Cálculo numérico. Aplicaciones de ingeniería. Machine Learning.
Lenguaje	R	Python	NetLogo	M

Aspecto	Software			
	R	Python	NetLogo	MATLAB
Entorno de desarrollo interactivo (IDE)	RStudio	Spyder PyCharm	NetLogo Programación de aplicaciones (APIs)	MATLAB GUI AppDesigner
Curva de aprendizaje	Intermedia	Intermedia	Fácil	Fácil
Complementos	Paquetes o librerías	Bibliotecas (Numpy, Pandas, Matplotlib, TensorFlow, SciPy)	-	Toolbox

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el presente trabajo se seleccionó el software MATLAB R2018a en su versión estudiantil, debido a que se basa en el uso de matrices y vectores, sumado a que es relativamente fácil de aprender a programar en dicho lenguaje, posee una buena capacidad de generación de gráficos, los cuales son de alta definición. Adicionalmente en la revisión del estado del arte, se identificó que existían varios antecedentes investigativos referentes al tema de interés en los que se trabajaba con MATLAB, razón por la que fue conveniente utilizar la mencionada herramienta para el desarrollo del estudio.

### 3. CAPÍTULO III

#### MARCO METODOLÓGICO

La metodología establece el modo o la manera en la que se lleva a cabo el proceso investigativo con base en el seguimiento de los objetivos establecidos previamente.

##### 3.1 Ubicación

La zona de estudio, que se muestra en el Anexo A del presente documento, consta de tres intersecciones, de entre las cuales dos son semaforizadas (Manuelita Sáenz y Pío Baroja, Manuelita Sáenz y Antonio Clavijo), desempeñando un papel importante en la gestión de la red vehicular. No obstante, dichas intersecciones son las causantes de la presencia de eventuales cuellos de botellas, al mismo tiempo que definen la capacidad vehicular, el flujo vehicular y la densidad de tráfico que circula por el sector del Paseo Shopping Ambato. En medio de las dos intersecciones semaforizadas, existe una intersección no semaforizada, formada por la avenida Manuelita Sáenz y la calle Miguel Delibes. A partir de la observación de campo, se evidenció que esta última tiene un flujo de tráfico pequeño, por este motivo no cuenta con semáforos. Otro aspecto a tener en cuenta es que el ingreso de los vehículos hacia las instalaciones del Paseo Shopping Ambato es por la avenida Manuelita Sáenz, mientras que la salida de los vehículos del interior del centro comercial es por la calle Pío Baroja, que tiene un solo sentido hasta la desembocadura en la avenida Manuelita Sáenz.

##### 3.2 Equipos y materiales

Para llevar a cabo el desarrollo del proceso investigativo se utilizaron los equipos y materiales que se describen a continuación:

**Tabla 3-1.** Equipos y materiales utilizados.

<b>Equipo / material</b>	<b>Detalle</b>
Videocámara	Equipo utilizado para la filmación del flujo de tráfico vehicular en las tres intersecciones del estudio.
Computadora	Equipo empleado para el registro y procesamiento de los datos recopilados.



<b>Equipo / material</b>	<b>Detalle</b>
Software de cómputo numérico MATLAB	Software empleado para el análisis de los datos.
Materiales de oficina, hojas de papel	Utilizados para las impresiones.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

### **3.3 Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo explicativa, puesto que a partir de la descripción del fenómeno del tráfico vehicular en la avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío Baroja y Antonio Clavijo en el sector del Paseo Shopping Ambato y la identificación de las variables involucradas, se plantea el establecimiento de las relaciones causales en los eventos (Hernández Sampieri et al., 2014, p. 95). De manera que se pueda ejecutar una simulación de los distintos escenarios del flujo del tráfico vehicular.

### **3.4 Prueba de Hipótesis**

Las hipótesis consideradas en el presente caso corresponden a la nulidad de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  de los modelos de regresión lineal simple. En este sentido las hipótesis son las siguientes:

#### **3.4.1 Hipótesis Nula $H_0$**

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

#### **3.4.2 Hipótesis Alterna $H_1$**

*$H_1$ : Al menos unos de los  $\beta$ 's es distinto de 0.*

El contraste de hipótesis se desarrolla mediante el cálculo del estadístico F de Fisher que se presenta en la Tabla ANOVA. En caso de rechazarse la hipótesis nula, existirá un modelo de regresión lineal válido.

### 3.5 Población y muestra

La población del presente estudio está conformada por el número de vehículos que circulan en el tramo de la avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío Baroja y Antonio Clavijo en el sector del Paseo Shopping Ambato. En vista de que la cantidad de la población depende del intervalo de tiempo considerado, es necesario establecer un lapso de interés. En este sentido, tomando en cuenta que se tiene por finalidad la simulación de diferentes escenarios de tráfico vehicular en el tramo de estudio, es preciso efectuar un muestreo de observaciones en distintos días y a diferentes horarios.

A partir de dichas mediciones se dispondrá de datos para el modelamiento del tráfico vehicular y que permitan la estimación del comportamiento en los diferentes escenarios analizados. A continuación se presenta el detalle de los días y horas en los que se efectúa la medición del tráfico vehicular:

**Tabla 3-2.** Muestreo por día y hora.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>No. mediciones</b>	<b>Observación</b>
Lunes a viernes	08H30	5	Importante flujo vehicular por ser horario de traslado hacia las unidades educativas.
Lunes a viernes	11H00	5	Ligero flujo vehicular.
Lunes a viernes	13H30	5	Importante flujo vehicular por el movimiento de receso de la jornada laboral y por fin o inicio de jornada en las instituciones educativas.
Lunes a viernes	18H30	5	Importante flujo vehicular por el movimiento de culminación de la jornada laboral e ingreso masivo de personas al centro comercial.
Lunes a viernes	20H00	5	Importante flujo vehicular por el ingreso masivo y salida de personas hacia y desde el centro comercial.
Sábados y domingos	10H00	2	Importante flujo vehicular por el ingreso masivo de personas hacia y desde el centro comercial.

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>No. mediciones</b>	<b>Observación</b>
Sábados y domingos	13H00	2	Importante flujo vehicular por el ingreso masivo y salida de personas hacia y desde el centro comercial.
Sábados y domingos	17H00	2	Importante flujo vehicular por el ingreso masivo y salida de personas hacia y desde el centro comercial.
Sábados y domingos	20H00	2	Importante flujo vehicular por el ingreso masivo y salida de personas hacia y desde el centro comercial.
Total	-	33	-

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

### **3.6 Recolección de información**

Para llevar a cabo la recolección de la información del tráfico vehicular en el tramo de la avenida Manuelita Sáenz comprendido entre las calles Pío Baroja y Antonio Clavijo, sector Paseo Shopping Ambato, es necesario determinar las intersecciones que componen el tramo de estudio. En este sentido, se identifican que existen tres intersecciones.

Con la finalidad de facilitar la identificación de las tres intersecciones involucradas en el estudio, es pertinente utilizar una nomenclatura específica siguiendo el sentido Norte-Sur, como se detalla a continuación:

Intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Pío de Baroja, A.

Intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Miguel Delibes, B.

Intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Antonio Clavijo, C.

Tomando en consideración las mencionadas intersecciones, se tienen los siguientes tramos de interés:

**Tabla 3-3.** Subtramos de la vía delimitados por las intersecciones.

Subtramo	Sentido	Distancia	Semaforización
A-B	Norte-Sur	155 m	8 semáforos vehiculares en la intersección A
B-A	Sur- Norte	140 m	
B-C	Norte-Sur	180 m	9 semáforos vehiculares en la intersección C
C-B	Sur- Norte	175 m	

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En cuanto a los sistemas de semaforización existentes en el tramo de estudio, a continuación se presenta el detalle de los tiempos programados para la operación de cada uno de ellos:



**Figura 3-1.** Semaforización en la intersección de la av. Manuelita Sáenz y Pío Baroja.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).



**Figura 3-2.** SemafORIZACIÓN en la intersección de la av. Manuelita Sáenz y A. Clavijo.  
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Los tiempos de operación de los sistemas de semafORIZACIÓN de las Figuras 3-1 y 3-2 se encuentran programados y sincronizados conforme la información de la Tabla 3-4:

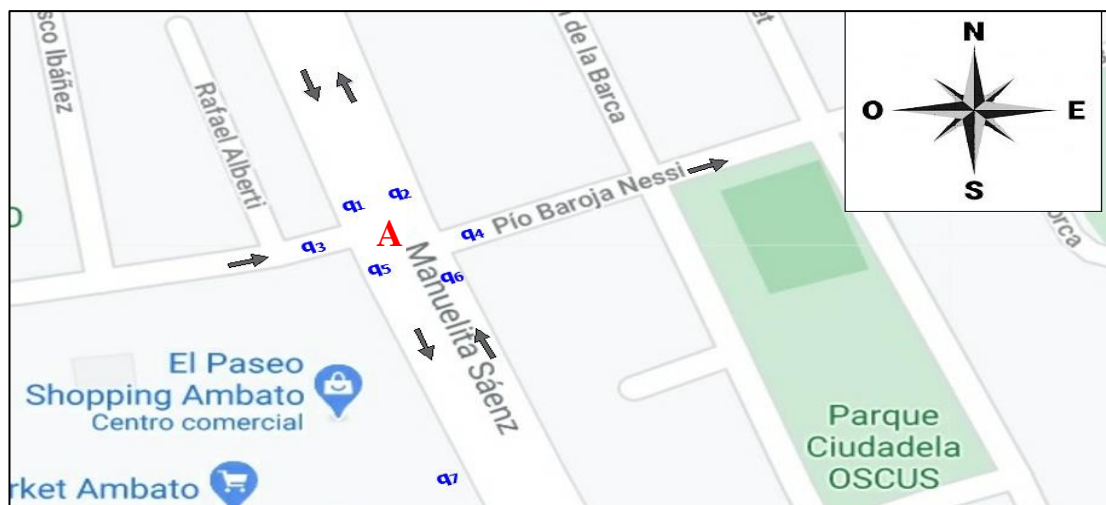
**Tabla 3-4.** Denominación de los semáforos.

INTERSECCIÓN	DENOMINACIÓN SEMÁFORO	SINCRONIZACIÓN	TIEMPO VERDE (s)	TIEMPO AMARILLO (s)	TIEMPO ROJO (s)
Subtramo A-B Manuelita Sáenz entre Pío Baroja Nessi y Miguel Delibes	1-a	3-a	19	2.92	17
	2-a	6-a	15	2.91	81
	3-a	1-a	19	2.92	17
	4-b	7-b	55	2.96	41
	5-a	8-a	37	2,83	60
	6-a	2-a	15	2.91	81
	7-b	4-b	55	2.96	41
	8-a	5-a	37	2.83	60
Subtramo B-C Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo	1-a	5-a	28	1.8	60
	2-a	8-a	16	1.83	110
	3-b	10-b	12	31.25	46
	4-a	7-a	24	2.03	104
	5-a	1-a	28	1.8	60
	6-a	9-a	40	1.86	48
	7-a	4-a	24	2.03	104
	8-a	2-a	16	1.83	110
	9-a	6-a	40	1.86	48
	10-b	3-b	12	31.25	46

**a** semáforo que indica dirección lineal, **b** semáforo que indica dirección de giro.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Una vez establecidas las intersecciones de la avenida Manuelita Sáenz con las calles transversales involucradas y el sistema de semaforización que está en funcionamiento, corresponde llevar a cabo la obtención de los datos de flujo y densidad de tráfico de acuerdo al muestreo establecido en la Tabla 3-2. La obtención de dichos datos se efectuó en las tres intersecciones A, B y C entre el 28 de septiembre y el 11 de octubre de 2020 en lapsos de 10 minutos, 5 antes y 5 después del horario indicado. Para el efecto se utilizarán cámaras de grabación de video para todos los carriles que forman parte del sistema. A continuación se muestran ilustraciones de los puntos de medición del flujo de tráfico en las tres intersecciones referidas (A, B y C):



**Figura 3-3.** Puntos de medición en intersección A, av. Manuelita Sáenz y Pío de Baroja. Elaborado por: Moyolema, A. (2021).



**Figura 3-4.** Puntos de medición en intersección B, av. Manuelita Sáenz y Miguel Delibes. Elaborado por: Moyolema, A. (2021).



**Figura 3-5.** Puntos de medición en la intersección C de la av. Manuelita Sáenz y Antonio Clavijo.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Posteriormente se registrará la información en una base de datos y se procederá a establecer un modelo macroscópico de simulación de tráfico mediante el uso de un software, para modelar el comportamiento de los distintos escenarios relacionados con el día, el horario y las condiciones particulares del tráfico vehicular.

### 3.7 Procesamiento de la información y análisis estadístico

El procesamiento de la información se llevó a cabo con el apoyo de un software de cómputo numérico. El procedimiento realizado para el efecto se describe a continuación:

- Una vez recopilados los flujos de tráfico a través de las 33 mediciones efectuadas en los cuatro subtramos del sistema estudiado, se establecieron los valores mínimos, máximos y promedios para los diferentes días de la semana y en los horarios observados. Los valores encontrados sirvieron para establecer los rangos de fluctuación de cada uno de los flujos de tráfico, teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos encontrados. Adicionalmente se elaboraron diagramas de caja para identificar los cuartiles de los flujos de tráfico de cada subtramo.
- Se determinaron las probabilidades de ocurrencia de los 22 flujos de tráfico en cada uno de los accesos, salidas e interior del sistema, para lo cual se tomaron

como referentes los datos recopilados en las 33 mediciones en cada uno de los subtramos.

- Para la toma de los datos de densidades de tráfico se efectuaron 40 recorridos en vehículo a través de cada uno de los subtramos de la avenida Manuelita Sáenz tanto en el sentido de subida, como en el de bajada. Se registraron los tiempos de cada recorrido, al mismo tiempo que el número de autos que circularon por cada subtramo. A partir de los datos de tiempo y conociendo la longitud de cada subtramo se determinaron las velocidades medias a la que circulan los vehículos, las cuales se esperaba que no excedan de 50 km/h, que es la velocidad máxima en el sector urbano según la Agencia Nacional de Tráfico. Se obtuvieron diagramas de caja para representar los valores mínimos, máximos y los cuartiles de las densidades de tráfico y de las velocidades.
- Los datos de densidad de tráfico y velocidad fueron utilizados para establecer un modelo de regresión lineal que define expresa la relación de la velocidad en función de la densidad de tráfico.
- Para representar los tiempos de semaforización se utilizaron diagramas de barras para cada uno de los semáforos existentes en las dos intersecciones A y B.
- La simulación de tráfico se realizó mediante la aplicación del modelo LWR para generar densidades de tráfico, velocidades y flujos en cada uno de los subtramos del sistema.
- Los flujos de tráfico se simularon mediante la aplicación de la probabilidad de ocurrencia de cada uno a partir de los datos recopilados. Los flujos de entrada se generaron de forma aleatoria, al igual que los flujos interiores que se obtuvieron de la simulación del modelo macroscópico LWR. De esta manera se calcularon los flujos de salida del sistema, considerando las mismas probabilidades de ocurrencia.

### **3.8 Variables respuesta o resultados alcanzados**

El establecimiento del modelo macroscópico LWR con las condiciones particulares para el caso del tráfico vehicular en la avenida Manuelita Sáenz entre la calle Pío de Baroja y avenida Antonio Clavijo se desarrolló con base en las siguientes consideraciones:



**Tabla 3-5.** Variables respuesta o resultados alcanzados.

<b>Aspecto</b>	<b>Variables de entrada</b>	<b>Variables de respuesta</b>
Simulación de tráfico a través del modelo macroscópico LWR.	Intervalos de espacio dentro de los tramos y tiempo. $x, t$ .	Densidad de tráfico, velocidad y flujo de tráfico. $\rho, v, q$ .
Función lineal para definir la densidad de tráfico vs. la velocidad.	Densidad de tráfico. $\rho$	Velocidad, $v$ .
Flujo de tráfico vehicular a través de probabilidad de ocurrencia del evento.	Flujos de tráfico de entrada al sistema. $q_1, q_3, q_{10}, q_{11}, q_{16}, q_{17}, q_{19}, q_{22}$ . Flujos interiores $q_5, q_{13}, q_{14}$ y $q_6$ .	Flujos de tráfico de salida al sistema. $q_2, q_4, q_7, q_8, q_9, q_{12}, q_{15}, q_{18}, q_{20}, q_{21}$ .

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En la Tabla 3-5 se muestran los tres aspectos desarrollados para la simulación de tráfico, la relación entre la densidad de tráfico y la velocidad, y el flujo vehicular en las entradas, salidas e interiores del sistema (cuatro subtramos AB, BC, CB y BA). Las variables de entrada son aquellas que se consideraron como datos de partida para mediante la aplicación de los modelos obtener las variables de salida, las cuales expresan los resultados o datos que se desean conocer a partir de los modelos.

## 4. CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Análisis descriptivo

##### 4.1.1 Flujo de tráfico vehicular

A partir de los datos de flujo vehicular recopilados en las 33 mediciones realizadas en cada uno de los subtramos de interés (Figuras 3-3 a 3-5), corresponde establecer la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los flujos de entrada, salida e interiores. La nomenclatura empleada para la identificación de cada uno se detalla como sigue:

##### **Flujos de entrada:**

$q_1$ , Flujo de tráfico de vehículos que ingresan desde la av. Manuelita Sáenz, sentido Norte-Sur hacia la intersección A.

$q_3$ , Flujo de tráfico de vehículos que ingresan desde la calle Pío de Baroja hacia la intersección A.

$q_{10}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la calle Miguel Delibes, sentido Este-Oeste hacia la intersección B.

$q_{11}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la calle Miguel Delibes, sentido Oeste-Este hacia la intersección B.

$q_{16}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la av. Antonio Clavijo, sentido Este-Oeste hacia la Av. Manuelita Sáenz (acceso lateral de la intersección C).

$q_{17}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la av. Antonio Clavijo, sentido Este-Oeste hacia la intersección C.

$q_{19}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la av. Antonio Clavijo, sentido Oeste-Este hacia la intersección C.

$q_{22}$ , Flujo de vehículos que ingresan desde la av. Manuelita Sáenz, sentido Sur-Norte hacia la intersección C.

**Flujos interiores y de salida:**

$q_2$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección A, por la av. Manuelita Sáenz sentido Sur-Norte.

$q_4$ , Flujo de vehículos que saldrán desde la intersección A, por la calle Pío de Baroja.

$q_7$ , Flujo de vehículos que ingresan al Paseo Shopping.

$q_9$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección B, por la calle Miguel Delibes sentido Este-Oeste.

$q_{12}$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección B, por la calle Miguel Delibes sentido Oeste-Este.

$q_{18}$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección C, por la av. Antonio Clavijo sentido Este-Oeste.

$q_{20}$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección C, por la av. Antonio Clavijo sentido Oeste-Este.

$q_{21}$ , Flujo de vehículos que salen desde la intersección C, por la av. Manuelita Sáenz sentido Norte-Sur.

$q_5$ , Flujo de vehículos que ingresan al subtramo A-B desde la intersección A.

$q_6$ , Flujo de vehículos que circulan por el subtramo B-A (Sentido Sur-Norte).

$q_8$ , Flujo de vehículos que ingresan a la intersección B desde el subtramo A-B.

$q_{13}$ , Flujo de vehículos que circulan por el subtramo B-C (Sentido Norte-Sur).

$q_{14}$ , Flujo de vehículos que ingresan a la intersección B desde el subtramo C-B.

$q_{15}$ , Flujo de vehículos que ingresan al subtramo C-B desde la intersección C.

### Sistema de ecuaciones lineales:

Con el objeto de establecer una relación entre los flujos de entrada y de salida en cada una de las intersecciones del tramo de estudio, se parte de la siguiente ecuación:

*Flujo vehicular de ingreso a una intersección = Flujo vehicular de salida de la intersección*

$$\sum q_{in} = \sum q_{sal}$$

Intersección A:

$$q_1 + q_3 + q_6 = q_2 + q_5 + q_4 \quad (10)$$

Ingreso a Paseo Shopping:

$$q_5 = q_7 + q_8 \quad (11)$$

Intersección B:

$$q_8 + q_{14} + q_{10} + q_{11} = q_{13} + q_6 + q_9 + q_{12} \quad (12)$$

Acceso lateral a Av. Manuelita Sáenz desde la av. Antonio Clavijo:

$$q_{15} + q_{16} = q_{14} \quad (13)$$

$$q_{15} = q_{14} - q_{16}$$

Intersección C:

$$q_{13} + q_{17} + q_{19} + q_{22} = q_{21} + q_{15} + q_{18} + q_{20} \quad (14)$$

*Nota:* No se considera el evento de que los vehículos pudieran quedarse estacionados en medio de cada subtramo A-B, B-C o viceversa; en cuyo caso el flujo de salida de una intersección sería distinto al de ingreso a la intersección subsecuente (con lo cual habrían 3 flujos adicionales). Esta suposición se considera fiable en vista de que la probabilidad de ocurrencia del evento referido es mínima y por facilidad de cálculo.

Reemplazando (11) en (10) y (13) en (14):

$$q_1 + q_3 + q_6 = q_2 + q_7 + q_8 + q_4 \quad (15)$$

$$q_6 = q_2 + q_7 + q_8 + q_4 - q_1 - q_3$$

$$q_{13} + q_{17} + q_{19} + q_{22} = q_{21} + q_{14} - q_{16} + q_{18} + q_{20} \quad (16)$$

$$q_{13} - q_{14} = q_{21} - q_{16} + q_{18} + q_{20} - q_{17} - q_{19} - q_{22}$$

Despejando  $q_{13} - q_{14}$  en (12):

$$q_{13} - q_{14} = q_8 + q_{10} + q_{11} - q_6 - q_9 - q_{12} \quad (17)$$

Reemplazando (15) y (16) en (17):

$$q_{21} - q_{16} + q_{18} + q_{20} - q_{17} - q_{19} - q_{22} = q_8 + q_{10} + q_{11} - (q_2 + q_7 + q_8 + q_4 - q_1 - q_3) - q_9 - q_{12}$$

$$q_{21} - q_{16} + q_{18} + q_{20} - q_{17} - q_{19} - q_{22} = q_8 + q_{10} + q_{11} - q_2 - q_7 - q_8 - q_4 + q_1 + q_3 - q_9 - q_{12}$$

$$q_1 + q_3 + q_{10} + q_{11} + q_{16} + q_{17} + q_{19} + q_{22} = q_{21} + q_{18} + q_{20} + q_2 + q_7 + q_4 + q_9 + q_{12} \quad (18)$$

Sustituyendo los datos recopilados en 33 observaciones (330 min) en (17).

Número de vehículos en 330 minutos:

$$4626 + 982 + 87 + 80 + 568 + 1244 + 845 + 3283 = 4073 + 1052 + 1276 + 3580 + 732 + 564 + 53 + 385$$

$$11715 = 11715$$

La probabilidad de ocurrencia de la suma total de vehículos a la entrada y salida de todo el sistema constituido por el tramo de la avenida Manuelita Sáenz entre las calles

Pío de Baroja y Antonio Clavijo es igual a 1, tomando en cuenta que representan todo el espacio muestral:

$$\sum P(q_{in}) = \sum P(q_{sal}) = 1 \quad (19)$$

En la fórmula (19) se pueden descomponer las probabilidades de salida, por ser las que interesan predecir. Tomando en consideración que se trata de sucesos mutuamente excluyente, la expresión equivalente es la siguiente:

$$\sum P(q_{sal}) = P(q_{21}) + P(q_{18}) + P(q_{20}) + P(q_2) + P(q_7) + P(q_4) + P(q_9) + P(q_{12}) = 1 \quad (20)$$

$$P(q_i) = \frac{q_i}{\sum q_{sal}} \quad (21)$$

$$\sum P(q_{sal}) = \frac{q_{21}}{\sum q_{sal}} + \frac{q_{18}}{\sum q_{sal}} + \frac{q_{20}}{\sum q_{sal}} + \frac{q_2}{\sum q_{sal}} + \frac{q_7}{\sum q_{sal}} + \frac{q_4}{\sum q_{sal}} + \frac{q_9}{\sum q_{sal}} + \frac{q_{12}}{\sum q_{sal}} = 1 \quad (22)$$

Por otra parte, en (11) se tiene:

$$P(q_5) = P(q_7) + P(q_8) = 1 \quad (23)$$

$$P(q_5) = \frac{q_7}{q_5} + \frac{q_8}{q_5} = 1 \quad (24)$$

De manera análoga en (13) se tiene:

$$P(q_{14}) = P(q_{15}) + P(q_{16}) = 1 \quad (25)$$

$$P(q_{14}) = \frac{q_{15}}{q_{14}} + \frac{q_{16}}{q_{14}} = 1 \quad (26)$$

A partir de los datos obtenidos en campo, se calculan las probabilidades de ocurrencia de los flujos de tráfico en el interior del tramo de estudio, teniendo en cuenta que la sumatoria de las probabilidades individuales es igual a 1. Esto representa que 11148 vehículos livianos y 567 pesados contabilizados equivalen a una probabilidad de 1. En

las fórmulas (22), (24) y (26) tomando en cuenta los datos disponibles, se tienen las siguientes expresiones para hallar las probabilidades:

$$P(q_{21}) = \frac{4073}{11715} = 0.34767$$

$$P(q_{18}) = \frac{1052}{11715} = 0.08980$$

$$P(q_{20}) = \frac{1276}{11715} = 0.10892$$

$$P(q_2) = \frac{3580}{11715} = 0.30559$$

$$P(q_7) = \frac{732}{11715} = 0.06248$$

$$P(q_4) = \frac{564}{11715} = 0.04814$$

$$P(q_9) = \frac{53}{11715} = 0.00452$$

$$P(q_{12}) = \frac{385}{11715} = 0.03286$$

En (11):

$$q_5 = q_7 + q_8$$

$$q_5 = 732 + 3944 = 4676$$

$$P(q_5)_2 = 1$$

$$P(q_7)_2 = \frac{q_7}{q_5} = \frac{732}{4676} = 0.15654$$

$$P(q_8)_2 = \frac{q_8}{q_5} = \frac{3944}{4676} = 0.84345$$

En (13):

$$q_{14} = q_{15} + q_{16}$$

$$q_{14} = 2701 + 568 = 3269$$

$$P(q_{14})_2 = 1$$

$$P(q_{15})_2 = \frac{q_{15}}{q_{14}} = \frac{2701}{3269} = 0.82625$$

$$P(q_{16})_2 = \frac{q_{16}}{q_{14}} = \frac{568}{3269} = 0.17375$$

A partir del conocimiento de los flujos de entrada (cuyos valores deben ser asignados según el horario) y una vez que se conocen todas las probabilidades de los flujos de tráfico, ya es posible predecir los flujos en el interior y a la salida del tramo de la avenida Manuelita Sáenz entre las calles Pío de Baroja y Antonio Clavijo. En este sentido se tienen los siguientes flujos de ingreso:

$$q_1, q_3, q_{10}, q_{11}, q_{16}, q_{17}, q_{19}, q_{22}$$

Los flujos interiores y salida se calculan de la siguiente manera:

- Se realiza la sumatoria de flujos de tráfico de entrada, que es equivalente al flujo total de salida.
- Cada uno de los flujos de tráfico de salida se obtienen del producto del flujo total de salida previamente calculado por la probabilidad respectiva de que ocurran dichos flujos, calculados en la fórmula (18):

$$q_{in} = q_{sal} = q_{sal} \sum P(q_i) = q_{sal} [P(q_{21}) + P(q_{18}) + P(q_{20}) + P(q_2) + P(q_7) + P(q_4) + P(q_9) + P(q_{12})] \quad (19)$$



$$q_2 = q_{sal} \cdot P(q_2)$$

$$q_4 = q_{sal} \cdot P(q_4)$$

$$q_7 = q_{sal} \cdot P(q_7)$$

$$q_9 = q_{sal} \cdot P(q_9)$$

$$q_{12} = q_{sal} \cdot P(q_{12})$$

$$q_{18} = q_{sal} \cdot P(q_{18})$$

$$q_{20} = q_{sal} \cdot P(q_{20})$$

$$q_{21} = q_{sal} \cdot P(q_{21})$$

- Los flujos de tráfico  $q_5$ ,  $q_8$ ,  $q_{14}$  y  $q_{15}$ , se calculan a partir de las probabilidades con datos aislados (las obtenidas en las fórmulas (23), (24), (25) y (26)).

$$q_5 = \frac{P(q_5)_2 \cdot q_7}{P(q_7)_2} = \frac{q_7}{P(q_7)_2}$$

$$q_8 = \frac{P(q_8)_2 \cdot q_7}{P(q_7)_2}$$

$$q_{14} = \frac{P(q_{14})_2 \cdot q_{16}}{P(q_{16})_2} = \frac{q_{16}}{P(q_7)_2}$$

$$q_{15} = \frac{P(q_{15})_2 \cdot q_{16}}{P(q_{16})_2}$$

- Finalmente, los flujos de tráfico  $q_6$  y  $q_{13}$  se obtienen de las fórmulas (15) y (14), respectivamente:

$$q_6 = q_2 + q_7 + q_8 + q_4 - q_1 - q_3$$

$$q_{13} = q_{21} + q_{15} + q_{18} + q_{20} - q_{17} - q_{19} - q_{22}$$

Si bien los dos últimos puntos definen una alternativa para expresar los flujos de tráfico  $q_5$ ,  $q_6$ ,  $q_8$ ,  $q_{13}$ ,  $q_{14}$  y  $q_{15}$ , éstos se pueden hallar mediante la aplicación del modelo macroscópico LWR, cuyo desarrollo se muestra en el apartado 4.2 del presente documento.

#### 4.1.1.1 Registro de flujo de tráfico a la entrada al sistema

Del estudio de campo realizado, en cada uno de los accesos o entradas al sistema del tramo de estudio se obtuvieron los flujos de tráfico indicados en la Tabla 4-1 y 4-2, para el caso de los vehículos livianos y pesados, respectivamente. Se han clasificado los datos por día y hora de la medición:

**Tabla 4-1.** Flujo de tráfico a la entrada al sistema para vehículos livianos.

Flujo de tráfico $q$ Vehículos/h	Día										
	Lunes a viernes						Sábado y domingo				
	Hora	8:30	11:00	13:30	18:30	20:00	Hora	10:00	13:00	17:00	20:00
q1	Máx.	888	864	1092	1200	654	Máx.	888	864	1092	654
	Media	733	804	840	1068	497	Media	733	804	840	497
	Mín.	606	756	702	852	366	Mín.	606	756	702	366
q3	Máx.	72	204	210	246	276	Máx.	72	204	210	276
	Media	55	134	182	239	191	Media	55	134	182	191
	Mín.	30	108	138	222	132	Mín.	30	108	138	132
q10	Máx.	18	36	18	36	42	Máx.	6	18	30	6
	Media	14	14	11	26	16	Media	3	15	24	3
	Mín.	12	0	6	12	0	Mín.	0	12	18	0
q11	Máx.	24	120	36	24	18	Máx.	18	0	12	6
	Media	7	31	14	12	9.6	Media	12	0	12	6
	Mín.	0	0	0	0	0	Mín.	6	0	12	6
q16	Máx.	120	108	192	150	114	Máx.	114	90	126	90
	Media	91	96	126	108	84	Media	90	87	111	60
	Mín.	72	72	72	48	36	Mín.	66	84	96	30
q17	Máx.	240	246	282	378	252	Máx.	216	264	216	204
	Media	202	206	233	302	193	Media	216	183	165	177
	Mín.	162	174	186	210	144	Mín.	216	102	114	150
q19	Máx.	150	198	288	216	204	Máx.	186	216	216	174
	Media	122	115	160	172	116	Media	180	174	213	141
	Mín.	102	0	18	120	72	Mín.	174	132	210	108
q22	Máx.	636	702	684	996	642	Máx.	666	540	588	600
	Media	574	565	594	695	108	Media	543	537	582	468
	Mín.	468	504	492	72	192	Mín.	420	534	576	336

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

**Tabla 4-2.** Flujo de tráfico a la entrada al sistema para vehículos pesados.

Flujo de tráfico $q$ Vehículos/h	Día										
	Lunes a viernes						Sábado y domingo				
	Hora	8:30	11:00	13:30	18:30	20:00	Hora	10:00	13:00	17:00	20:00
q1	Máx.	48	96	48	78	42	Máx.	42	42	42	24
	Media	38	49	38	49	28	Media	39	30	36	21
	Mín.	24	30	30	5	18	Mín.	36	18	30	18
q3	Máx.	3	1	1	1	1	Máx.	0	0	0	1
	Media	1	1	0	0	0	Media	0	0	0	1
	Mín.	0	0	0	0	0	Mín.	0	0	0	0
q10	Máx.	1	1	1	0	0	Máx.	0	0	0	1
	Media	0	0	0	0	0	Media	0	0	0	1
	Mín.	0	0	0	0	0	Mín.	0	0	0	0
q11	Máx.	1	1	2	1	1	Máx.	0	0	0	0
	Media	0	0	1	0	0	Media	0	0	0	0
	Mín.	0	0	0	0	0	Mín.	0	0	0	0
q16	Máx.	2	4	3	1	1	Máx.	0	0	0	2
	Media	1	2	2	0	0	Media	0	0	0	2
	Mín.	0	1	1	0	0	Mín.	0	0	0	1
q17	Máx.	4	3	2	3	2	Máx.	2	2	2	0
	Media	2	2	1	2	0	Media	1	2	1	0
	Mín.	0	1	1	1	0	Mín.	0	1	0	0
q19	Máx.	3	2	2	3	3	Máx.	1	1	1	3
	Media	2	1	1	1	1	Media	1	1	1	2
	Mín.	1	0	0	0	0	Mín.	0	0	0	1
q22	Máx.	66	60	60	54	36	Máx.	24	36	42	30
	Media	61	46	36	47	22	Media	21	27	30	21
	Mín.	54	24	18	42	6	Mín.	18	18	18	12

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

#### 4.1.1.2 Registro de flujo de tráfico en el interior del sistema

En el interior de los subtramos se obtuvieron los flujos de tráfico vehicular que se muestran en la Tabla 4-3, clasificados por día y hora:

**Tabla 4-3.** Flujo de tráfico en el interior del sistema para vehículos livianos y pesados.

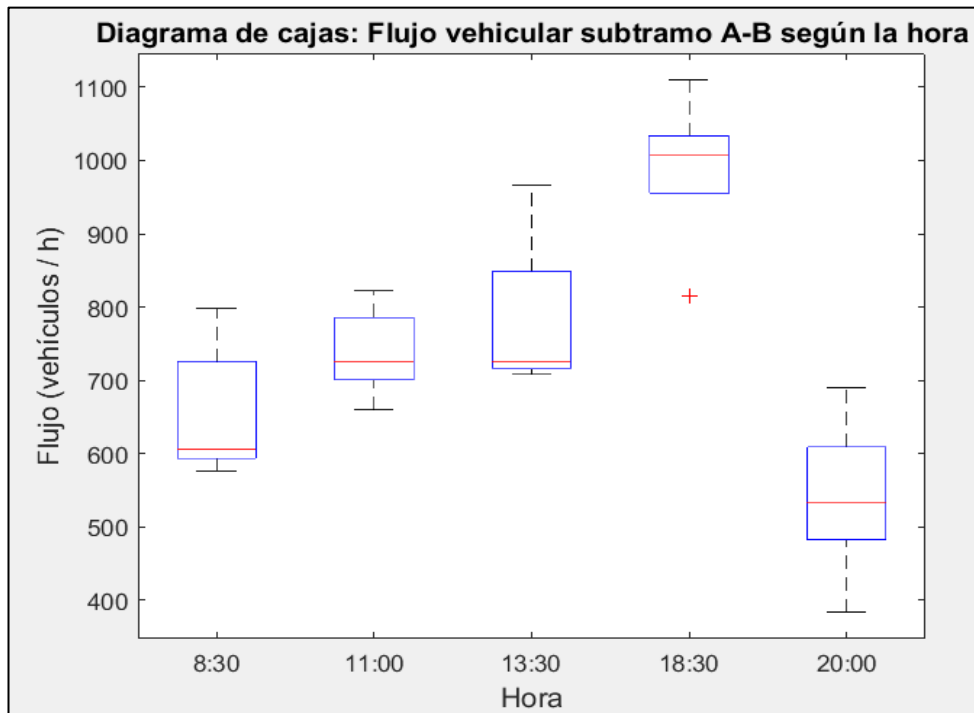
Flujo de tráfico $q$ Vehículos/h	Día										
	Lunes a viernes						Sábado y domingo				
	Hora	8:30	11:00	13:30	18:30	20:00	Hora	10:00	13:00	17:00	20:00
q5	Máx.	918	966	1146	1308	726	Máx.	906	990	1302	840
	Mín.	642	744	762	882	378	Mín.	750	906	1050	690
q6	Máx.	792	696	714	1038	534	Máx.	546	558	708	780

Flujo de tráfico $q$ Vehículos/h	Día										
	Lunes a viernes						Sábado y domingo				
	Hora	8:30	11:00	13:30	18:30	20:00	Hora	10:00	13:00	17:00	20:00
q13	Mín.	510	528	558	654	366	Mín.	516	498	582	528
	Máx.	732	876	888	948	702	Máx.	750	756	750	768
q14	Mín.	540	510	618	750	426	Mín.	426	600	708	444
	Máx.	690	786	762	846	690	Máx.	606	588	780	624
	Mín.	546	462	516	738	276	Mín.	492	576	522	480

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

A continuación se presentan los diagramas de cajas del flujo de tráfico en el interior de cada uno de los subtramos.

### Subtramo A-B

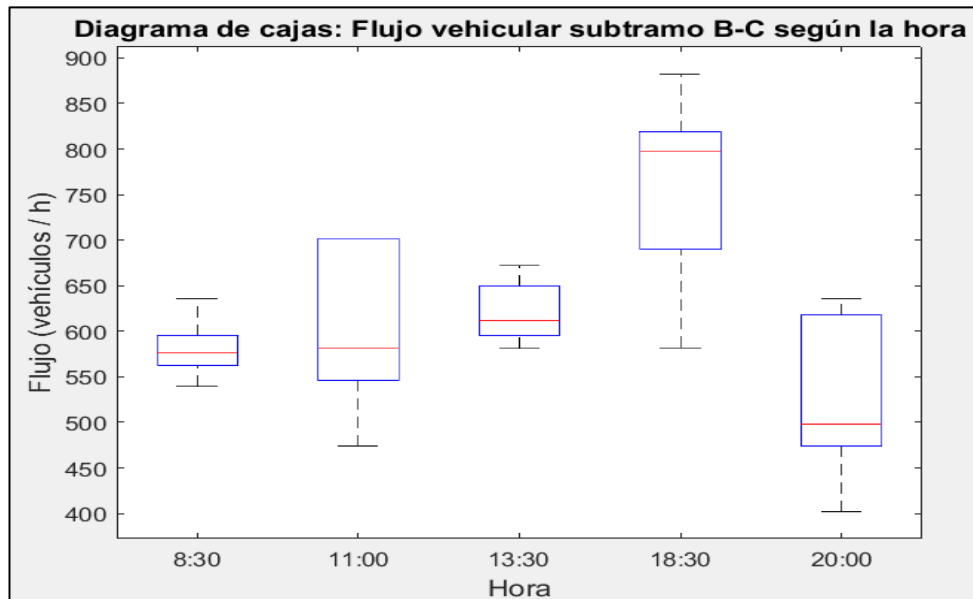


**Gráfico 4-1.** Flujos de tráfico del subtramo AB según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Como se observa en el Gráfico 4-1 en el subtramo AB, el flujo de tráfico  $q_5$  máximo se alcanzó a las 18:30 horas con un valor de 1100 vehículos/h, mientras que el mínimo a las 20:00 horas con 378 vehículos/h.

### Subtramo B-C

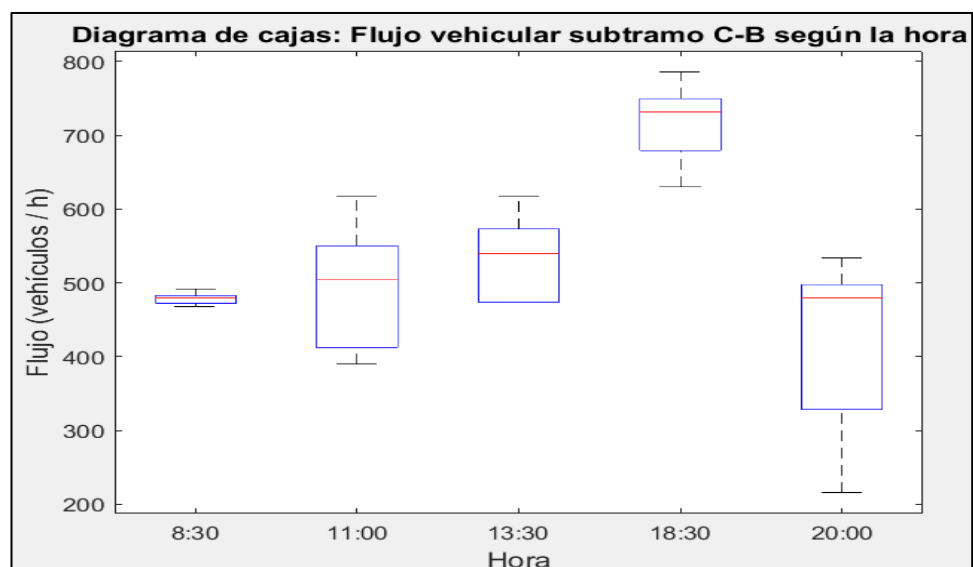


**Gráfico 4-2.** Flujos de tráfico del subtramo BC según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Conforme se muestra en el Gráfico 4-2 en el subtramo BC, el flujo de tráfico  $q_{13}$  máximo se alcanzó a las 18:30 horas con un valor de 948 vehículos/h, mientras que el mínimo a las 20:00 horas con 426 vehículos/h.

### Subtramo C-B

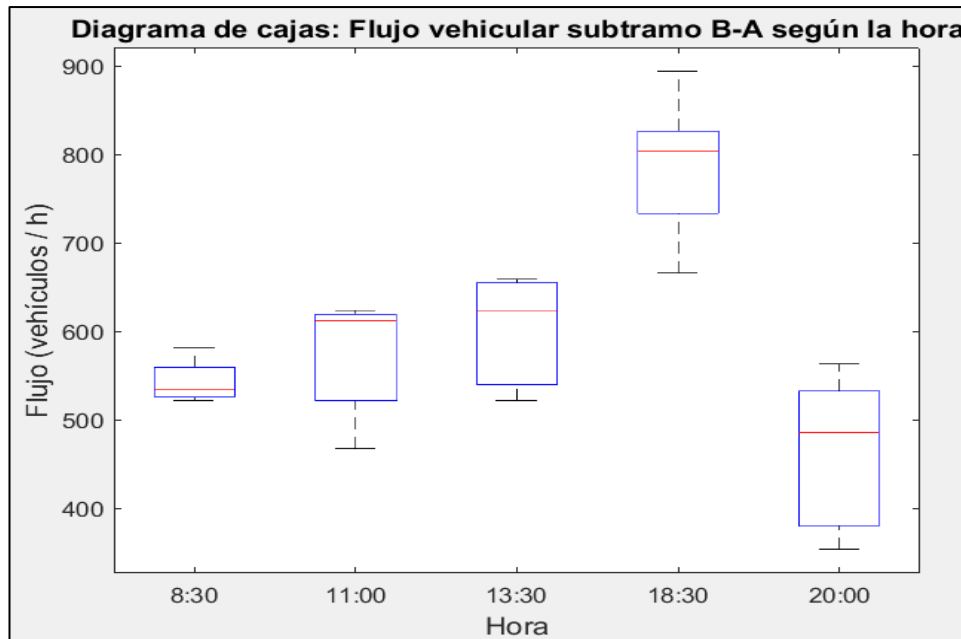


**Gráfico 4-3.** Flujos de tráfico del subtramo CB según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Conforme se muestra en el Gráfico 4-3 en el subtramo CB, el flujo de tráfico  $q_{14}$  máximo se alcanzó a las 18:30 horas con un valor cercano a 800 vehículos/h, mientras que el mínimo a las 20:00 horas con 366 vehículos/h.

### Subtramo B-A



**Gráfico 4-4.** Flujos de tráfico del subtramo BA según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

De acuerdo a la información del Gráfico 4-4 en el subtramo BA, el flujo de tráfico  $q_6$  máximo se alcanzó a las 18:30 horas con un valor cercano a 900 vehículos/h, mientras que el mínimo a las 20:00 horas con 366 vehículos/h.

Los datos observados de los flujos de tráfico en cada subtramo, especialmente los mínimos y máximos por día y hora, sirven como referencia para la generación de valores aleatorios en la simulación de flujos que se presenta en el apartado 4.2.3 del presente documento.

#### 4.1.2 Densidad de tráfico

Las densidades de tráfico observadas en las mediciones efectuadas durante el período de medición de campo se expresan a continuación en la Tabla 4-4:

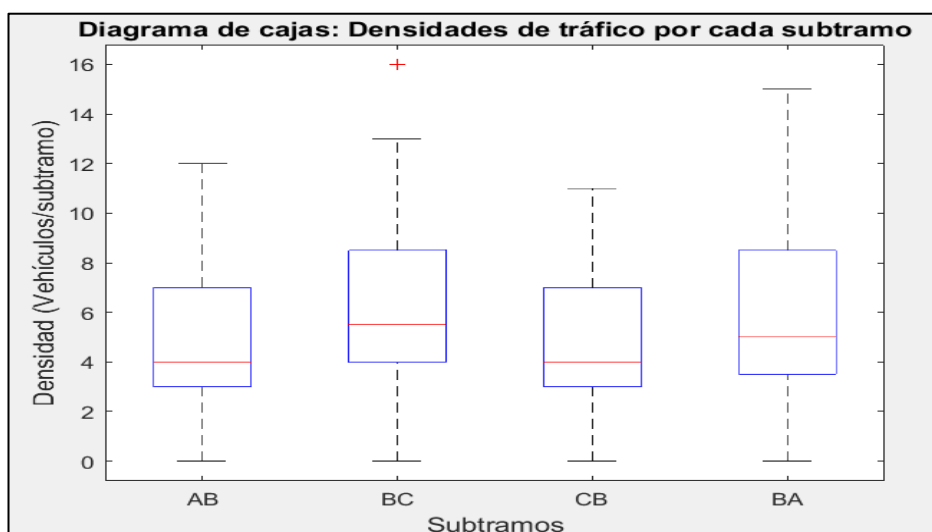
**Tabla 4-4.** Flujo promedio de vehículos livianos según el día y la hora, subtramo AB.

<b>SUBTRAMO</b>				
<b>Distancia (km)</b>	0.155	0.180	0.175	0.140
	<b>A-B</b>	<b>B-C</b>	<b>C-B</b>	<b>B-A</b>
	Manuelita Sáenz entre Pío de Baroja y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo	Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío de Baroja
	Sentido Norte-Sur	Sentido Norte-Sur	Sentido Sur-Norte	Sentido Sur-Norte
<b>No. Observación</b>	<b>Densidades de tráfico (Vehículos / subtramo)</b>			
1	0	4	4	6
2	6	13	3	3
3	7	4	4	4
4	3	16	7	10
5	5	9	9	6
6	2	8	0	11
7	3	2	2	2
8	4	1	1	6
9	9	9	9	7
10	6	2	2	4
11	3	5	3	10
12	0	3	3	4
13	4	10	9	13
14	1	3	5	8
15	3	1	1	4
16	0	10	3	3
17	5	8	6	6
18	6	5	5	5
19	4	4	4	4
20	8	8	2	2
21	3	4	4	4
22	4	6	6	6
23	5	5	5	15
24	3	4	4	4
25	12	8	11	9
26	10	9	9	10
27	7	6	3	3
28	10	7	7	0
29	2	0	0	1
30	9	10	3	3
31	4	5	10	10
32	11	7	7	5
33	-	2	2	2

SUBTRAMO				
Distancia (km)	0.155	0.180	0.175	0.140
	A-B	B-C	C-B	B-A
	Manuelita Sáenz entre Pío de Baroja y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo	Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío de Baroja
	Sentido Norte-Sur	Sentido Norte-Sur	Sentido Sur-Norte	Sentido Sur-Norte
No. Observación	Densidades de tráfico (Vehículos / subtramo)			
34	-	0	0	0
35	-	9	9	7
36	-	13	6	8
37	-	7	7	13
38	-	-	-	7
39	-	-	-	6
40	-	-	-	1
Mínimo	0	0	0	0
Media	4.97	6.14	4.73	5.80
Mediana	4	6	4	5.5
Máximo	12	16	11	15
Desviación Estándar	3.24	3.77	3.02	3.66
Coefficiente de variación	0.6516	0.6149	0.6394	0.6310

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Complementariamente se muestra el diagrama de cajas de las densidades en cada subtramo:



**Gráfico 4-5.** Densidades de tráfico por subtramo según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).



Según se aprecia en el Gráfico 4-5, las mayores densidades de tráfico se obtuvieron en los subtramos BC y BA, el valor más alto fue de 16 vehículos por subtramo, que se considera como un valor atípico, porque sale del rango establecido hasta el cuarto intercuartil.

### 4.1.3 Velocidad

Las velocidades observadas en las mediciones efectuadas durante el período de medición de campo se expresan a continuación en la Tabla 4-5:

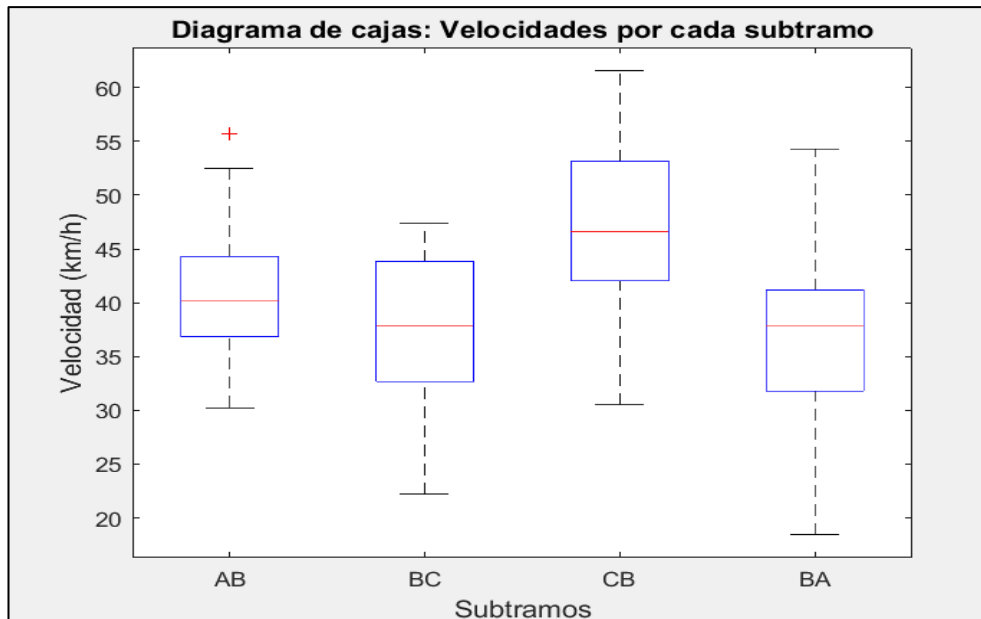
**Tabla 4-5.** Flujo promedio de vehículos livianos según el día y la hora, subtramo AB.

<b>SUBTRAMO</b>				
<b>Distancia (km)</b>	0.155	0.180	0.175	0.140
	<b>A-B</b>	<b>B-C</b>	<b>C-B</b>	<b>B-A</b>
	Manuelita Sáenz entre Pío de Baroja y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo	Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío de Baroja
	Sentido Norte-Sur	Sentido Norte-Sur	Sentido Sur-Norte	Sentido Sur-Norte
<b>No. Observación</b>	<b>Velocidades (km/h)</b>			
1	54.22	39.93	42.63	36.05
2	35.34	25.50	46.53	41.18
3	36.86	45.51	54.69	42.46
4	41.99	22.25	42.37	22.91
5	40.46	32.69	40.65	39.90
6	43.46	34.16	61.58	25.60
7	41.58	47.37	52.28	43.60
8	44.64	46.59	54.97	41.28
9	32.92	32.42	39.30	33.76
10	39.10	40.42	53.16	45.49
11	44.64	39.27	52.63	27.05
12	55.74	44.66	49.53	39.90
13	46.97	31.53	38.82	20.54
14	51.33	43.84	40.08	31.80
15	41.83	47.06	54.08	41.31
16	52.49	24.95	51.68	32.58
17	38.91	36.78	42.97	36.21
18	37.05	37.16	45.39	45.53
19	41.36	37.85	51.51	40.45

<b>SUBTRAMO</b>				
<b>Distancia (km)</b>	0.155	0.180	0.175	0.140
	<b>A-B</b>	<b>B-C</b>	<b>C-B</b>	<b>B-A</b>
	Manuelita Sáenz entre Pío de Baroja y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo	Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes	Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío de Baroja
	Sentido Norte-Sur	Sentido Norte-Sur	Sentido Sur-Norte	Sentido Sur-Norte
<b>No. Observación</b>	<b>Velocidades (km/h)</b>			
20	32.40	35.31	53.71	37.95
21	41.70	40.20	44.55	39.07
22	38.04	35.08	42.03	35.80
23	44.32	45.06	40.13	18.45
24	38.72	30.25	43.75	31.92
25	30.90	36.59	30.51	26.67
26	31.24	30.73	31.47	23.89
27	39.63	38.59	52.90	38.89
28	30.24	37.96	46.74	54.31
29	44.39	45.00	54.59	40.26
30	30.38	32.61	55.90	37.87
31	39.80	38.99	27.22	24.59
32	28.52	30.92	36.32	41.87
33	-	45.92	48.67	48.63
34	-	42.62	53.32	53.25
35	-	33.25	33.51	32.82
36	-	27.63	37.98	36.33
37	-	34.25	34.55	21.56
38	-	-	-	28.35
39	-	-	-	27.42
40	-	-	-	53.41
<b>Mínimo</b>	28.52	22.25	27.22	18.45
<b>Media</b>	40.35	37.05	45.48	36.02
<b>Mediana</b>	40.13	37.16	45.39	37.10
<b>Máximo</b>	55.74	47.37	61.58	54.31
<b>Desviación Estándar</b>	7.01	6.65	8.34	9.14
<b>Coefficiente de variación</b>	0.1736	0.1795	0.1834	0.2538

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Adicionalmente se presenta el diagrama de cajas de las velocidades en cada subtramo:

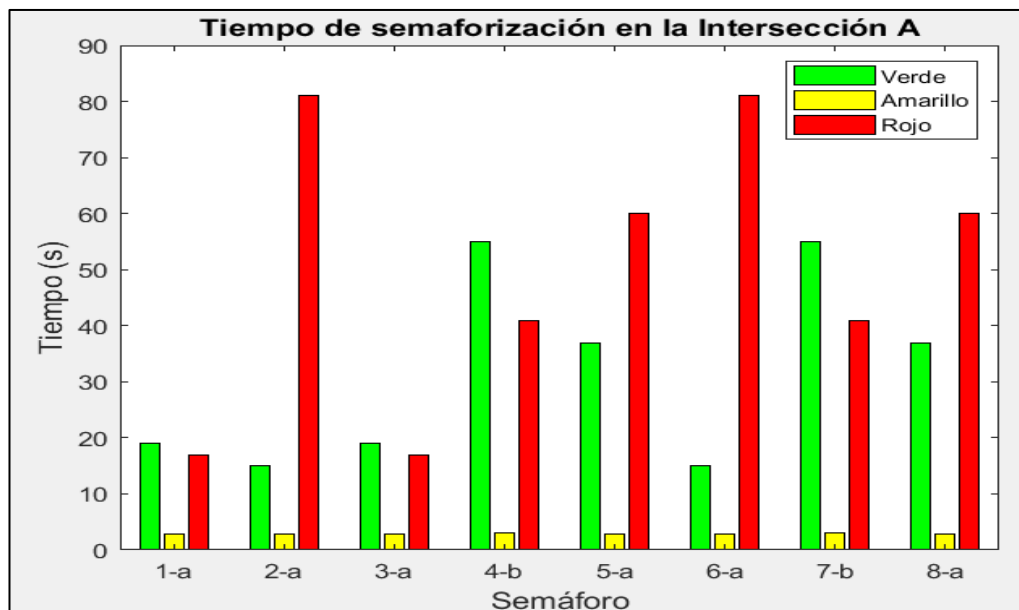


**Gráfico 4-6.** Velocidades por subtramo según la hora del día.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

De acuerdo a la información del Gráfico 4-6, las mayores velocidades de tráfico se obtuvieron en el subtramo CB, el valor más alto excedió los 60 km/h, que se considera como un valor atípico, porque sale del rango de velocidad máxima moderada admitida en el perímetro urbano.

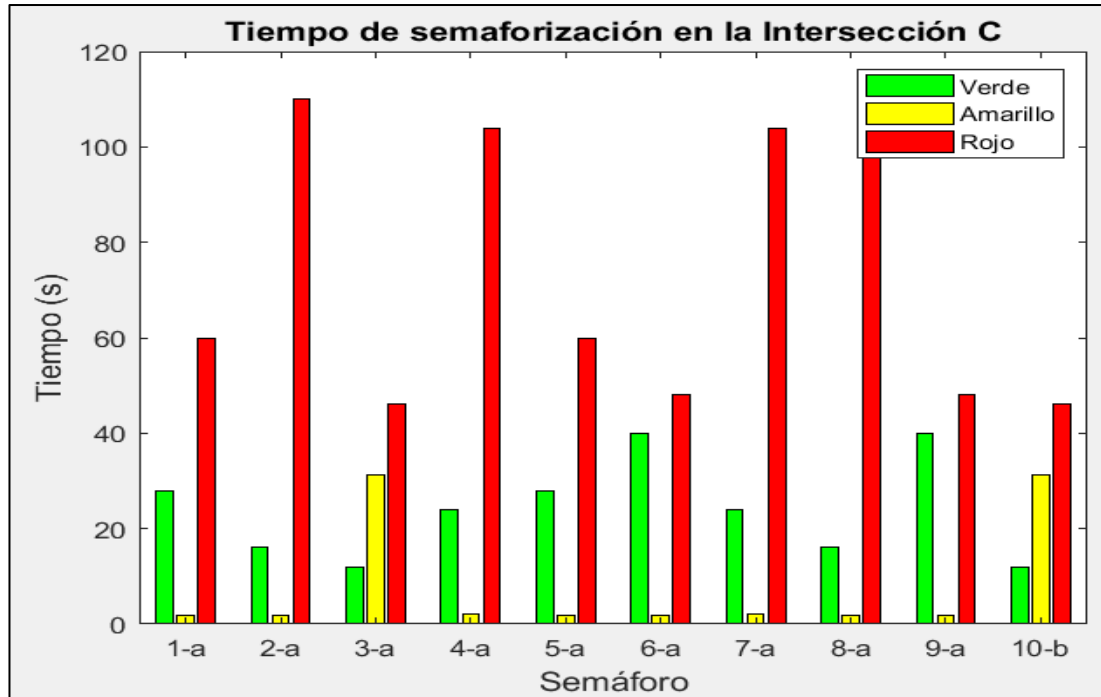
#### 4.1.4 Tiempos de semaforización



**Gráfico 4-7.** Tiempos de semaforización en la intersección A.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-7 se indica la duración de los tiempos de semaforización actualmente configurados en la intersección de la avenida Manuelita Sáenz y Pío de Baroja. De manera análoga, se representan los tiempos de semaforización para los ubicados en la intersección de la avenida Manuelita Sáenz y Antonio Clavijo.



**Gráfico 4-8.** Tiempos de semaforización en la intersección C.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Los tiempos de semaforización se utilizaron para la simulación del modelo de tráfico LWR, exactamente para definir el número de eventos que se obtienen en una duración de una hora reloj, cuyo desarrollo se presenta en los apartados 4.2.1 y 4.2.2 del presente documento.

#### 4.1.5 Relación de la densidad, velocidad y flujo

La relación de las magnitudes densidad de tráfico, velocidad y flujo, se puede expresar a través de la ecuación fundamental del flujo vehicular (ecuación 1). Paralelamente, es posible incorporar las magnitudes fundamentales espacio y tiempo, con la finalidad de analizar el comportamiento vehicular en un determinado tramo y en un intervalo de tiempo definido. De esta manera, la densidad de tráfico es una función de la forma  $\rho(x, t)$  y el flujo otra de la forma  $q(x, t)$ . A partir de esto es posible contar con una expresión que relacione las cinco magnitudes mediante un modelo matemático, como

el LWR (Lighthill-Whitham-Richards), que se trata de un modelo macroscópico ampliamente utilizado (ecuación 50 y 52).

Ecuación fundamental del tráfico vehicular:

$$q = \rho \cdot v \quad (27)$$

**Modelo macroscópico:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (28)$$

Sustituyendo (27) en (28) se tiene una Ecuación Diferencial Parcial, modelo LWR (Lighthill-Whitham-Richards):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

Densidad inicial:

$$\rho(0) = \rho_0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (30)$$

### **Método de características o técnica analítica de resolución**

Este método de resolución de una ecuación diferencial parcial consiste en encontrar una solución al problema, a partir de las condiciones iniciales y de frontera, así como con la utilización de funciones existentes que relacionan a las variables involucradas. Particularmente es de interés la utilización de una función que exprese la velocidad a partir de la densidad de tráfico, siendo que existen algunas funciones que han sido publicadas (Hernández-Vega, 2016), tales como: Greenshields (31), Greenberg (38), Underwood (39) y Pipes-Murigel (40), que son de tipo lineal, logarítmica o exponencial. De entre las cuales se utiliza la ecuación de Greenshields, por ser la ampliamente utilizadas y que entraña una menor complejidad.

La velocidad depende de la densidad vehicular:

$$v = v(\rho) \quad \text{función}$$

La función debe satisfacer las 3 condiciones:

$$\frac{dv}{d\rho} < 0 \quad \text{función decreciente}$$

$$\rho = 0 \rightarrow v = v_{\text{máx}}$$

$$\rho = \rho_{\text{máx}} (\rho_{\text{jam}}) \rightarrow v = 0$$

De acuerdo a Greenshields:

$$v = v_{\text{máx}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}}\right) \quad \text{Función lineal} \quad (31)$$

Sustituyendo (31) en (27):

$$q = \rho \cdot v_{\text{máx}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}}\right) \quad (32)$$

$$q = v_{\text{máx}} \left(\rho - \frac{\rho^2}{\rho_{\text{máx}}}\right) \quad (33)$$

$$\rho = \rho_{\text{máx}} \rightarrow q = 0$$

$$\rho = 0 \rightarrow q = 0$$

Derivando la expresión (32) con respecto a  $d\rho$  para hallar los puntos críticos se tiene:

$$\frac{dq}{d\rho} = v_{\text{máx}} \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{\text{máx}}}\right) \quad (34)$$

$$\frac{dq}{d\rho} = 0 \rightarrow \rho_{\text{máx}} = 2\rho$$

$$\rho = \frac{\rho_{\text{máx}}}{2} \quad \text{punto crítico} \quad (35)$$

Para determinar si es un mínimo o un máximo, aplicamos la segunda derivada a la ecuación (33):

$$\frac{d^2q}{d\rho^2} = -\frac{2 v_{\text{máx}}}{\rho_{\text{máx}}} < 0 \quad (36)$$

$$\therefore \rho = \frac{\rho_{\text{máx}}}{2} \quad \text{punto crítico máximo}$$

Reemplazando (34) en (32):

$$q_{\text{máx}} = v_{\text{máx}} \left( \frac{\rho_{\text{máx}}}{2} - \frac{\rho_{\text{máx}}^2}{4 \rho_{\text{máx}}} \right)$$

$$q_{\text{máx}} = \frac{v_{\text{máx}} \cdot \rho_{\text{máx}}}{4}$$

$$q_{\text{máx}} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} \cdot \frac{\rho_{\text{máx}}}{2} \quad (37)$$

De acuerdo a Greenberg:

$$v = v_{\text{máx}} \cdot \ln \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}} \right) \quad \text{Función logarítmica} \quad (38)$$

De acuerdo a Underwood:

$$v = v_{\text{máx}} \cdot e^{-\frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}}} \quad \text{Función exponencial} \quad (39)$$

De acuerdo a Pipes-Murigel:

$$v = v_{\text{máx}} \left( 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}} \right)^n \right) \quad n > 1; n \in Z \quad (40)$$

Adicional a la posibilidad de utilización de las ecuaciones de Greenshields (31), Greenberg (38), Underwood (39) y Pipes-Murigel (40), se puede determinar una función propia, mediante un análisis de regresión, para lo cual es necesario contar con datos particulares de densidad de tráfico y velocidad para diferentes. En este sentido se utilizan los datos obtenidos en el estudio de campo para cada uno de los subtramos AB, BC, CB y BA. El modelo general de la función lineal que describe la relación de las dos variables involucradas es el siguiente:

$$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho \quad (41)$$

Donde:

$\beta_0$  intercepto de la función lineal obtenida mediante regresión.

$\beta_1$  pendiente de la función lineal obtenida mediante regresión.

$$\begin{aligned} \rho = 0 &\rightarrow v = v_{m\acute{a}x} = \beta_0 \\ \rho = \rho_{m\acute{a}x} (\rho_{jam}) &= -\frac{\beta_0}{\beta_1} \rightarrow v = 0 \end{aligned}$$

Sustituyendo (41) en (27):

$$q = \rho (\beta_0 + \beta_1 \cdot \rho) \quad (42)$$

$$q = \beta_0 \cdot \rho + \beta_1 \cdot \rho^2 \quad (43)$$

Derivando la expresión (43) con respecto a  $d\rho$  para hallar los puntos críticos se tiene:

$$\frac{dq}{d\rho} = \beta_0 + 2\beta_1 \cdot \rho \quad (44)$$

$$\frac{dq}{d\rho} = 0 \rightarrow \rho = -\frac{\beta_0}{2\beta_1} \text{ punto crítico} \quad (45)$$

Para determinar si es un mínimo o un máximo, aplicamos la segunda derivada a la ecuación (43):



$$\frac{d^2q}{d\rho^2} = 2\beta_1 \quad (46)$$

En vista de que la pendiente  $\beta_1$  es negativa, dado que la relación velocidad es inversamente proporcional a la densidad de tráfico, en (20) se tiene:

$$\frac{d^2q}{d\rho^2} = 2\beta_1 < 0$$

$$\therefore \rho = -\frac{\beta_0}{2\beta_1} \quad \text{punto crítico máximo}$$

Sustituyendo (45) en (43):

$$\begin{aligned} q_{m\acute{a}x} &= \beta_0 \left( \frac{-\beta_0}{2\beta_1} \right) + \beta_1 \cdot \left( \frac{-\beta_0}{2\beta_1} \right)^2 \\ q_{m\acute{a}x} &= -\frac{\beta_0^2}{2\beta_1} + \frac{\beta_0^2}{4\beta_1} \\ q_{m\acute{a}x} &= -\frac{\beta_0^2}{4\beta_1} \end{aligned} \quad (47)$$

La velocidad máxima cuando el flujo de tráfico es máximo es:

$$\begin{aligned} v_{m\acute{a}x} &= \frac{q_{m\acute{a}x}}{\rho_{m\acute{a}x}} \\ v_{m\acute{a}x} &= \frac{-\frac{\beta_0^2}{4\beta_1}}{-\frac{\beta_0}{2\beta_1}} \\ v_{m\acute{a}x} &= \frac{\beta_0}{2} \end{aligned} \quad (48)$$

### Técnica de solución numérica

La resolución analítica solamente halló soluciones para los valores máximos y mínimos de las magnitudes densidad de tráfico, velocidad y flujo, poniendo atención en los puntos máximos y mínimos. Sin embargo, es necesario definir el comportamiento a partir del tiempo y el espacio, razón por la cual es necesario efectuar un análisis de diferencias finitas, que permita determinar las densidades de tráfico a

partir de las densidades anteriores en una ubicación específica de un tramo y en un instante de tiempo concreto. Para el efecto se hace una discretización del dominio en subintervalo de tiempo y espacio.

Modelo LWR:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (49)$$

La velocidad depende de la densidad:

$$v = v(\rho) \quad \text{función}$$

Condición inicial:

$$\rho(x, 0) = \rho_0(x)$$

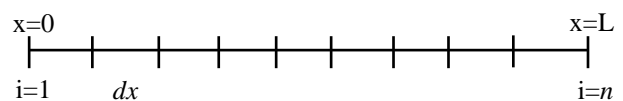
Condición de frontera:

$$\rho(0, t) = \alpha$$

$$\rho(L, t) = \beta$$

Método de Diferencias Finitas:

Discretización del dominio en subintervalos del espacio:



$n$  número de nodos,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

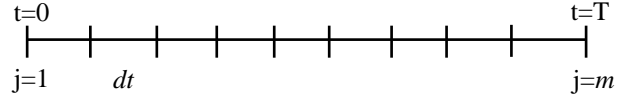
$i=1$  frontera izquierda

$i=n$  frontera derecha

$$x(i + 1) = x(i) + dx; \quad i = 1, 2, \dots, n - 1$$

$$dx = \frac{L - 0}{n - 1}; \quad n - 1 \text{ es el número de subintervalos}$$

Discretización del dominio en subintervalos del tiempo:



$n$  número de nodos,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$

$j=1$  frontera izquierda

$j=m$  frontera derecha

$$t(j + 1) = t(j) + dt; \quad j = 1, 2, \dots, m - 1$$

$$dt = \frac{T}{m - 1}; \quad m - 1 \text{ es el número de subintervalos}$$

Modelo LWR:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{\rho(x, t + dt) - \rho(x, t)}{dt} = \frac{\rho(i, j + 1) - \rho(i, j)}{dt}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{v(x, t) - v(x - dx, t)}{dx} = \frac{v(i, j) - v(i - 1, j)}{dx}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \approx \frac{\rho(x, t) - \rho(x - dx, t)}{dx} = \frac{\rho(i, j) - \rho(i - 1, j)}{dx}$$

Sustituyendo en (50):

$$\frac{\rho(i, j + 1) - \rho(i, j)}{dt} + \rho(i, j) \frac{v(i, j) - v(i - 1, j)}{dx} + v(i, j) \frac{\rho(i, j) - \rho(i - 1, j)}{dx} = 0 \quad (51)$$

Multiplicando a toda la expresión por  $dt$ , se tiene el Esquema de diferencias finitas para el modelo LWR:

$$\rho(i, j + 1) - \rho(i, j) + \frac{dt}{dx} [\rho(i, j)[v(i, j) - v(i - 1, j)] + v(i, j)[\rho(i, j) - \rho(i - 1, j)]] = 0$$

$$\rho(i, j + 1) = \rho(i, j) - \frac{dt}{dx} [\rho(i, j)[v(i, j) - v(i - 1, j)] + v(i, j)[\rho(i, j) - \rho(i - 1, j)]] \quad (52)$$

Condición inicial:

De acuerdo a Greenshields:

$$v(i, j) = v_{m\acute{a}x} \left[ 1 - \frac{\rho(i, j)}{\rho_{m\acute{a}x}} \right] \quad (53)$$

$$\rho(i, 1) = \rho_0(i)$$

Condición de frontera:

$$\rho(1, j) = \alpha$$

$$\rho(n, j) = \beta$$

$$v(1, j) = v_{m\acute{a}x} \left[ 1 - \frac{\rho(1, j)}{\rho_{m\acute{a}x}} \right]$$

$$v(n, j) = v_{m\acute{a}x} \left[ 1 - \frac{\rho(n, j)}{\rho_{m\acute{a}x}} \right]$$

Esquema iterativo:

El esquema iterativo para el modelo LWR consiste en las expresiones (52) y (53).

Si en lugar de utilizar la ecuación de Greenshields se utiliza la ecuación encontrada de los datos, en lugar de la expresión (53) se tendría la expresión (54):

$$v(i, j) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho(i, j) \quad (54)$$

#### 4.1.6 Relación densidad de tráfico y velocidad

A partir de los datos disponibles se determinaron los modelos de regresión que relacionan la velocidad vs la densidad de tráfico para cada uno de los subtramos. Los modelos encontrados son los siguientes:

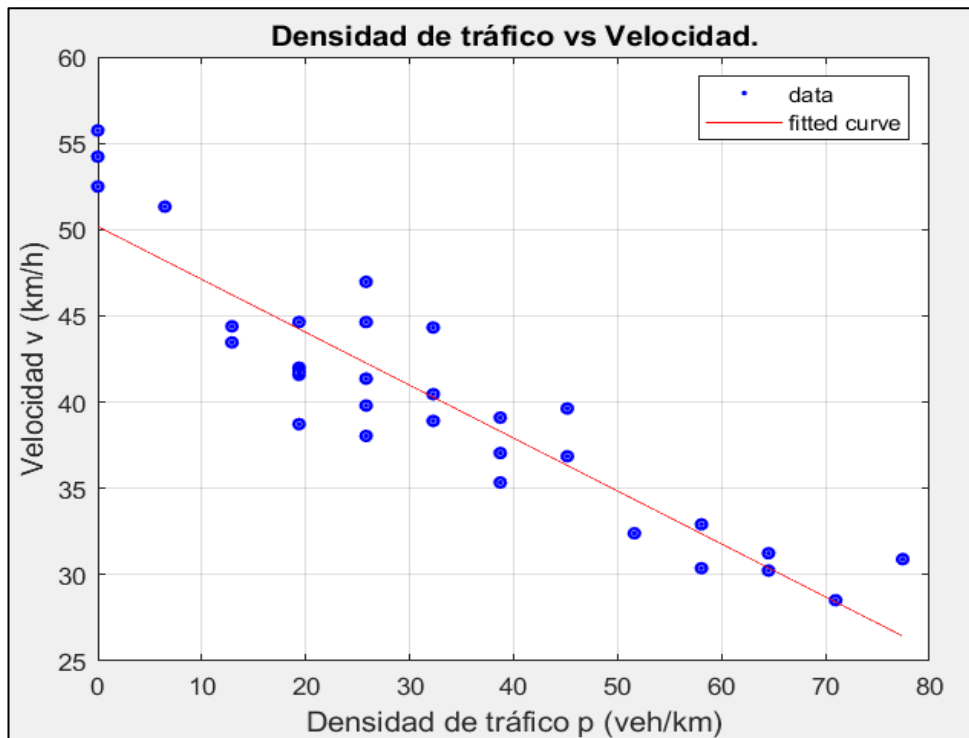
**Tabla 4-6.** Función lineal de  $v(\rho)$ .

	<b>Función de Greenshields</b>	<b>Función a partir de los datos</b>
<b>Tipo</b>	<b>Teórica</b>	<b>Experimental</b>
Forma genérica	$v = v_{m\acute{a}x} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{m\acute{a}x}} \right)$	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho$
Subtramo AB	$v = 55.74 - 0.7146 \cdot \rho$	$v = 50.18 - 0.3066 \cdot \rho$
Subtramo BC	$v = 47.37 - 0.5322 \cdot \rho$	$v = 46.64 - 0.2813 \cdot \rho$
Subtramo CB	$v = 60 - 0.9524 \cdot \rho$	$v = 57.12 - 0.4308 \cdot \rho$
Subtramo BA	$v = 54.31 - 0.5076 \cdot \rho$	$v = 48.82 - 0.3089 \cdot \rho$

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Con la finalidad de analizar la validez de los modelos de regresión de la densidad de tráfico y velocidad, en cada uno de los casos (subtramos) se analizó el error de la predicción. A continuación, se muestran las métricas de error halladas en cada uno de los modelos y adicionalmente se presenta la gráfica de la distribución de los datos, conjuntamente con la curva de regresión correspondiente:

### Subtramo AB



**Gráfico 4-9.** Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Los parámetros y métricas de error se indican en la Tabla 4-7 mostrada como sigue:

**Tabla 4-7.** Parámetros del modelo de regresión de  $v(\rho)$  en el subtramo AB.

<b>Modelo de regresión</b>	$v = 50.18 - 0.3066 \cdot \rho$
<b>Intercepto</b>	50.18
<b>Pendiente</b>	-0.3066
<b>Métricas de error</b>	
Coeficiente de correlación (r)	-0.91411
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	0.83560
Error cuadrático medio (MSE)	8.3388
Raíz del error cuadrático medio (RSME)	2.8877
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	5.65%

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

A continuación se presenta la Tabla ANOVA, que muestra el valor del estadístico F de Fisher, que es el parámetro de contraste de hipótesis para la validez del modelo de regresión lineal:

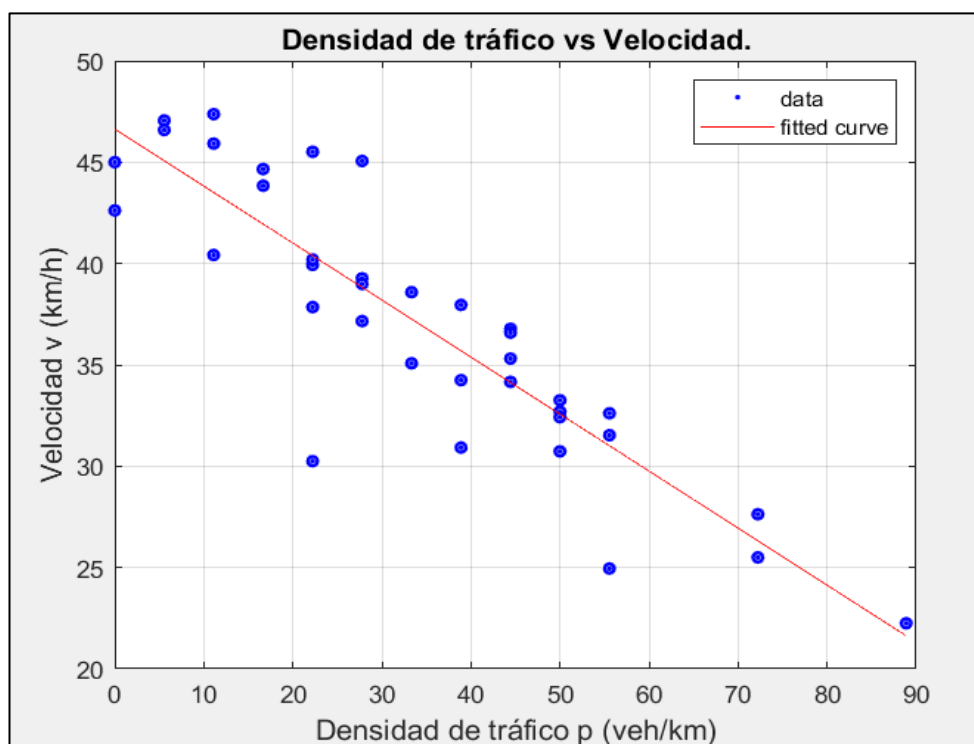
**Tabla 4-8.** Tabla ANOVA del modelo de regresión de  $v(\rho)$  en el subtramo AB.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Sumas cuadráticas</b>	<b>Medias cuadráticas</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Regresión	1	1271.52	1271.52	152.48	$2.72 \times 10^{-13}***$
Error	30	250.16	8.34	-	-
Total	31	1521.68	-	-	-

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Conforme los datos de la tabla ANOVA, se observa que el p-valor es de  $2.72 \times 10^{-13}$  es inferior a 0.05, lo que quiere decir que el modelo de regresión encontrado para la relación de la velocidad a partir de la densidad de tráfico en el subtramo AB es válido.

## Subtramo BC



**Gráfico 4-10.** Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo BC.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

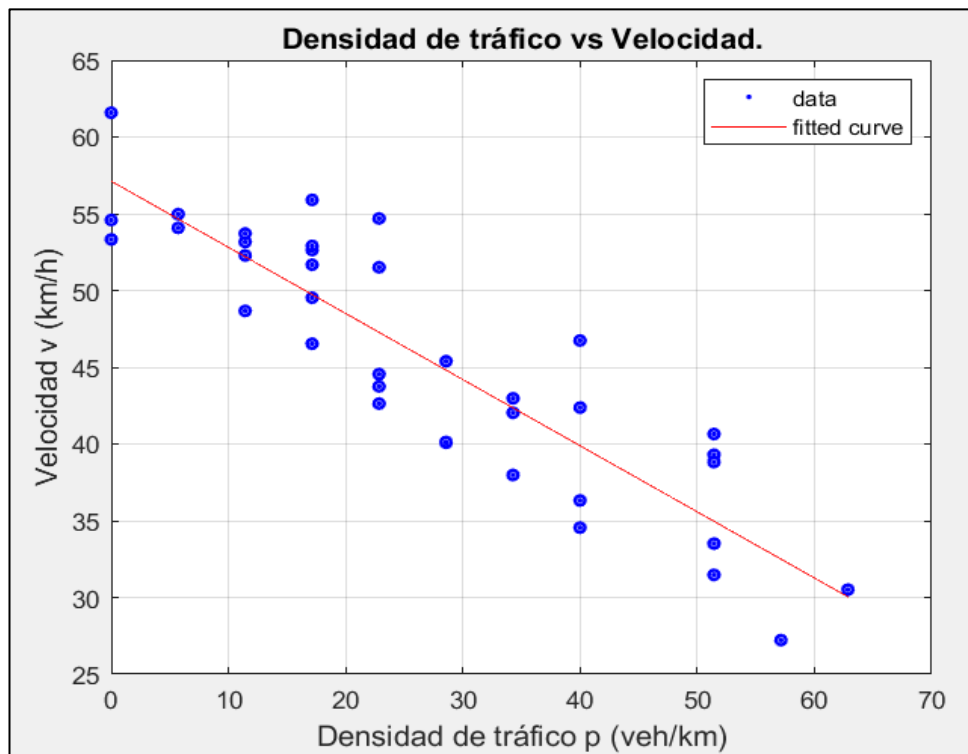
Los parámetros y métricas de error se indican en la Tabla 4-9 mostrada como sigue:

**Tabla 4-9.** Parámetros del modelo de regresión de  $v(\rho)$  en el subtramo BC.

<b>Modelo de regresión</b>	$v = 46.64 - 0.2813 \cdot \rho$
<b>Intercepto</b>	46.64
<b>Pendiente</b>	-0.2813
<b>Métricas de error</b>	
Coeficiente de correlación (r)	-0.88649
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	0.78586
Error cuadrático medio (MSE)	9.74184
Raíz del error cuadrático medio (RSME)	3.1212
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	6.16%

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo CB



**Gráfico 4-11.** Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo CB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Los parámetros y métricas de error se indican en la Tabla 4-10 mostrada como sigue:

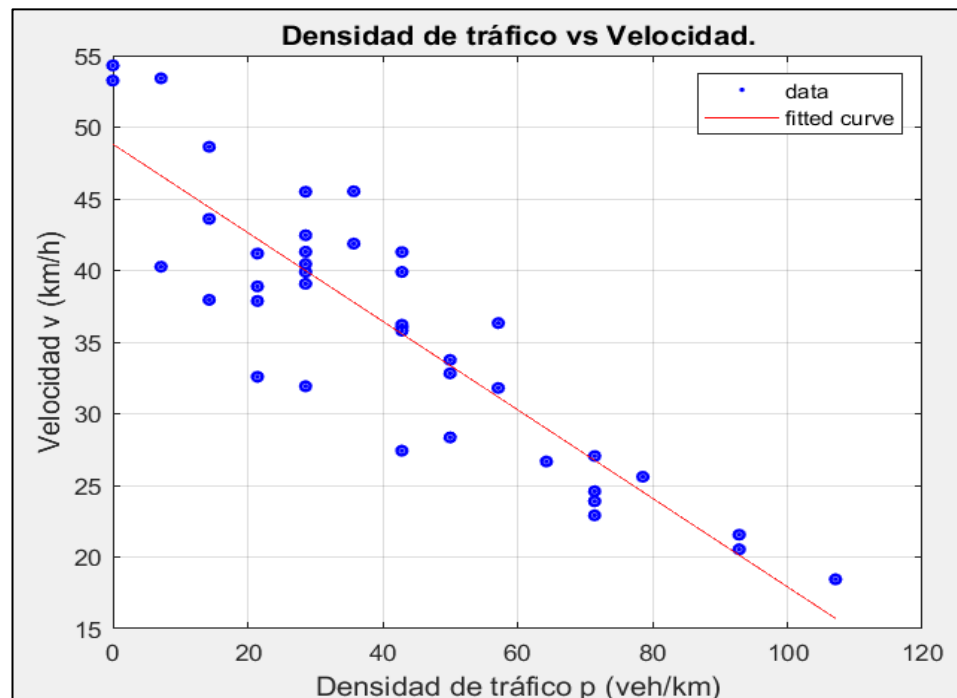
**Tabla 4-10.** Parámetros del modelo de regresión de  $v(\rho)$  en el subtramo CB.

<b>Modelo de regresión</b>	$v = 57.12 - 0.4308 \cdot \rho$
<b>Intercepto</b>	57.12
<b>Pendiente</b>	-0.4308
<b>Métricas de error</b>	
Coeficiente de correlación ( $r$ )	-0.8927
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	0.7969
Error cuadrático medio (MSE)	14.5335
Raíz del error cuadrático medio (RSME)	3.81229
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	7.26%

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).



## Subtramo BA



**Gráfico 4-12.** Gráfico de dispersión de la densidad de tráfico vs velocidad, subtramo BA.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Los parámetros y métricas de error se indican en la Tabla 4-11 mostrada como sigue:

**Tabla 4-11.** Parámetros del modelo de regresión de  $v(\rho)$  en el subtramo BA.

<b>Modelo de regresión</b>	$v = 48.82 - 0.3089 \cdot \rho$
<b>Intercepto</b>	48.82
<b>Pendiente</b>	-0.3089
<b>Métricas de error</b>	
Coeficiente de correlación ( $r$ )	-0.88342
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	0.78043
Error cuadrático medio (MSE)	18.8316
Raíz del error cuadrático medio (RSME)	4.3396
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	9.32%

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En términos generales los cuatro modelos de regresión lineal encontrados son satisfactorios para predecir el comportamiento de los datos de velocidad a partir de las densidades de flujo, debido a que las métricas de error así lo indican.

## 4.2 Análisis de resultados

### 4.2.1 Simulación del modelo LWR con la función teórica de Greenshields

La simulación del tráfico vehicular tiene como punto de partida la determinación de las posiciones y tiempos dentro de cada uno de los subtramos, para lo cual se aplicó la ecuación del modelo LWR (ecuación 52). En cada simulación se genera una matriz de datos de espacio  $x$  y tiempo  $t$  a partir de la que se obtienen los flujos de tráfico, las velocidades y los flujos. Con la finalidad de tomar en cuenta los tiempos de semaforización que actualmente se encuentran vigentes, se procedió a generar un número de eventos  $N$  producidos en un lapso de tiempo de una hora reloj. La cantidad de eventos se obtuvo de la relación del tiempo total de 1 hora sobre la suma de los tiempos de duración de las luces amarilla, verde y rojo del semáforo. Adicionalmente se generaron valores aleatorios de densidad y velocidad iniciales, como punto de partida de la simulación acumulativa de la solución numérica del modelo LWR. Además se destaca que la solución del problema requirió la consideración de la función de la velocidad a partir de la densidad de tráfico, con el modelo de Greenshields para el caso del modelo teórico (que se analizó en primer lugar en este apartado). Los resultados obtenidos de la simulación se resumen a continuación:

#### Subtramo AB

**Tabla 4-12.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo AB.

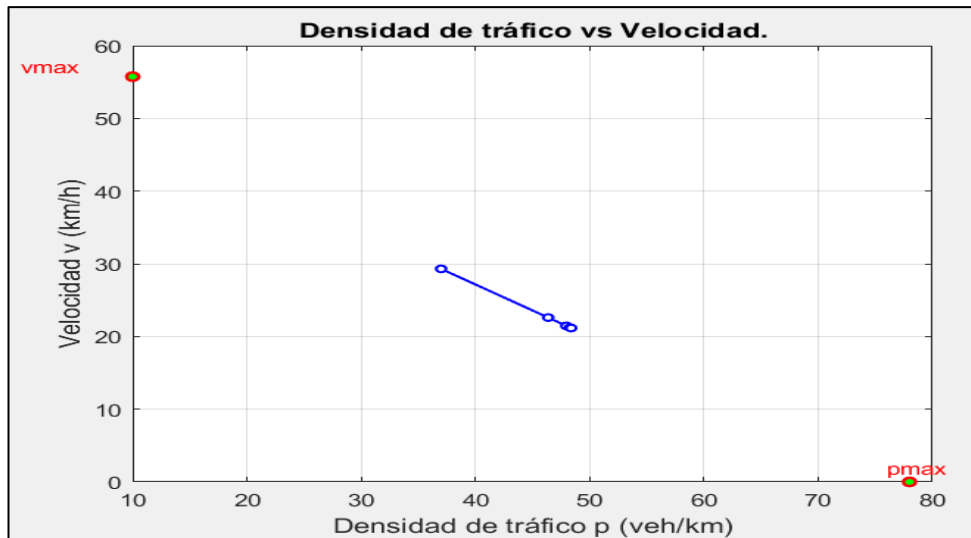
Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Función	$v(\rho)$	$v = 55.74 - 0.7146 \cdot \rho$
Longitud del subtramo*	L	0.155 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 92$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max}$	78 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.

<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Velocidad máxima	vmax	55.74 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	Tr	17 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	Ta	3 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	Tv	19 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	kir	Número aleatorio en el rango (10-78) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	vir	Número aleatorio en el rango (18-55.74) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Densidades de tráfico medias de los N eventos	pprom	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	vprom	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	qmax	Número (veh/h).
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q5)	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q5	q5.mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

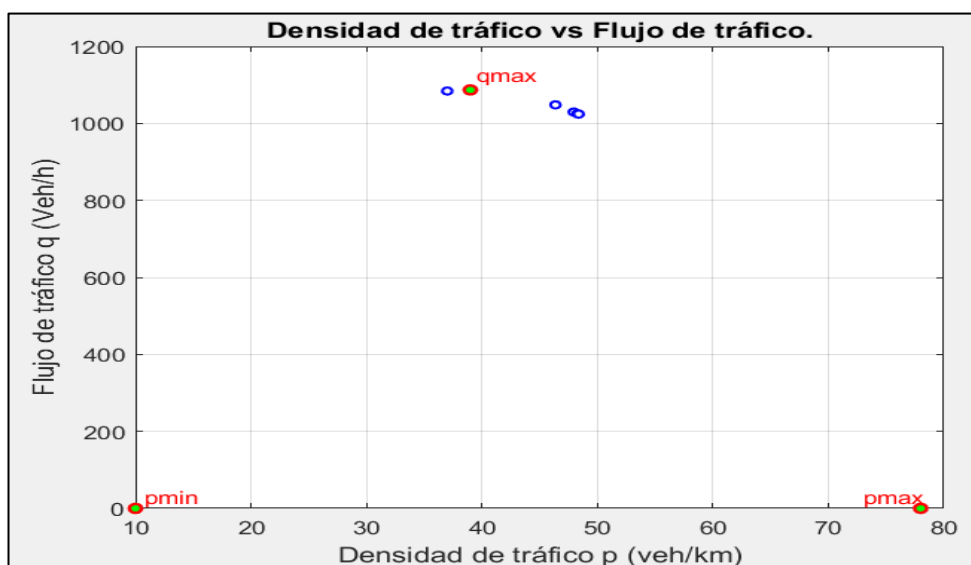
En el Gráfico 4-13 se presenta la simulación de densidades de tráfico versus velocidades en el último evento generado en el subtramo AB (evento 92). También constan en el gráfico los valores mínimo y máximo de ambas variables.



**Gráfico 4-13.** Simulación de las densidades de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

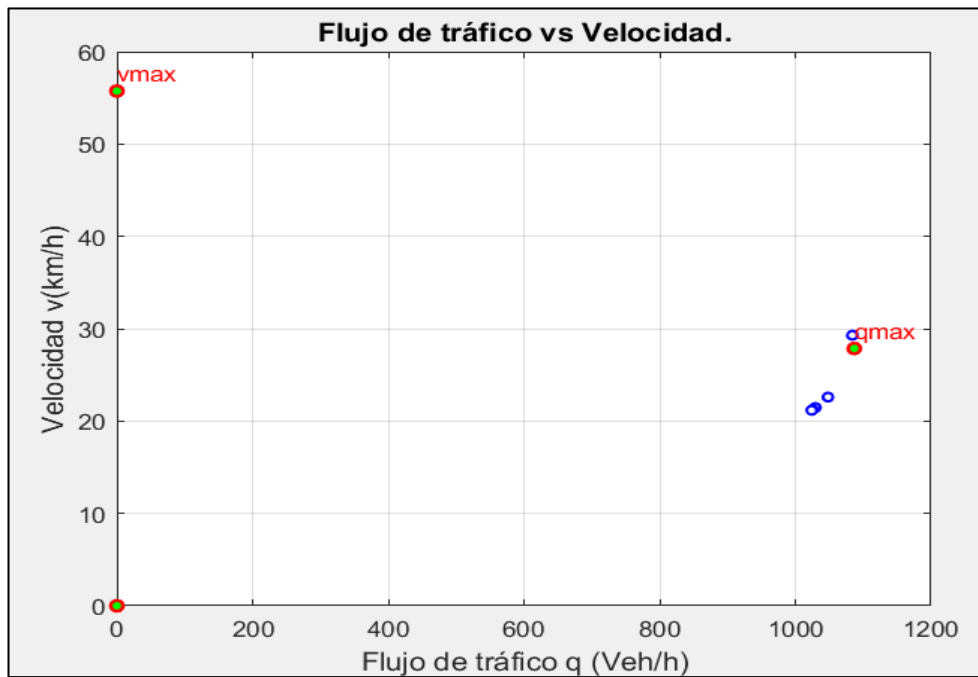
En el Gráfico 4-14 se presenta la simulación de las densidades de tráfico versus flujo en el último evento generado en el subtramo AB (evento 92). Adicionalmente se muestran los valores máximos de la densidad y flujo. Cabe destacar que en el caso mostrado, se observa que los vehículos al inicio estuvieron en la zona de no congestión y posteriormente en la región de congestionamiento, se considera que el límite entre ambas regiones viene dado por el flujo máximo, considerando que a la izquierda no existe congestión y a la derecha sí la hay.



**Gráfico 4-14.** Simulación de las densidades de tráfico vs flujo, evento 92 subtramo AB.

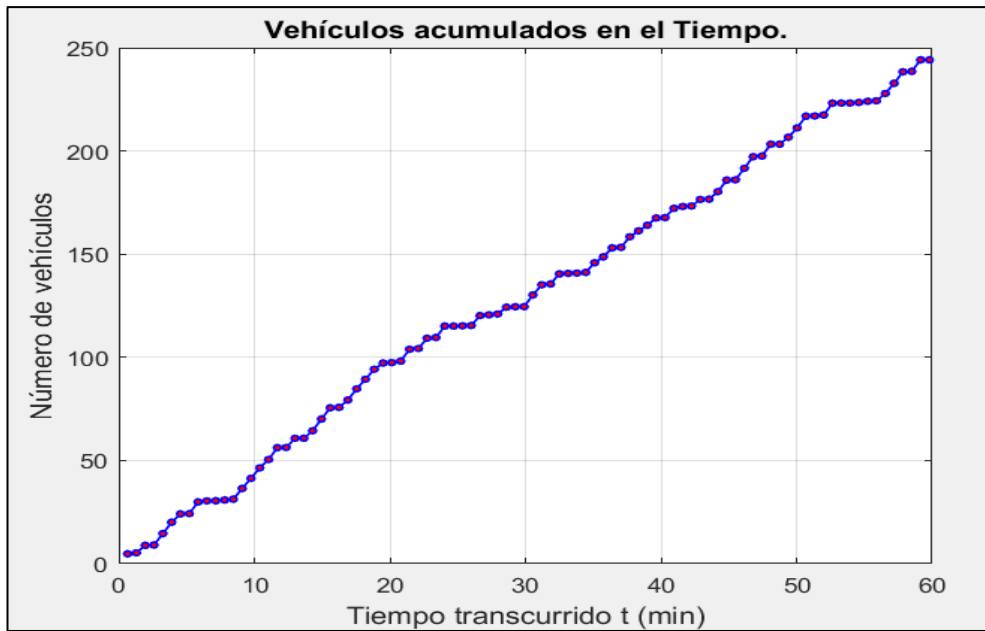
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Por otra parte, en el Gráfico 4-15, consta la simulación de los flujos de tráfico versus las velocidades del último evento del subtramo AB. Se indican también los valores máximos de ambas variables. En el evento mostrado se aprecia que los vehículos alcanzan el flujo máximo y posteriormente disminuyen el flujo debido a que se presenta congestión vehicular, lo que empieza a ralentizar la velocidad a la que circulan los autos.



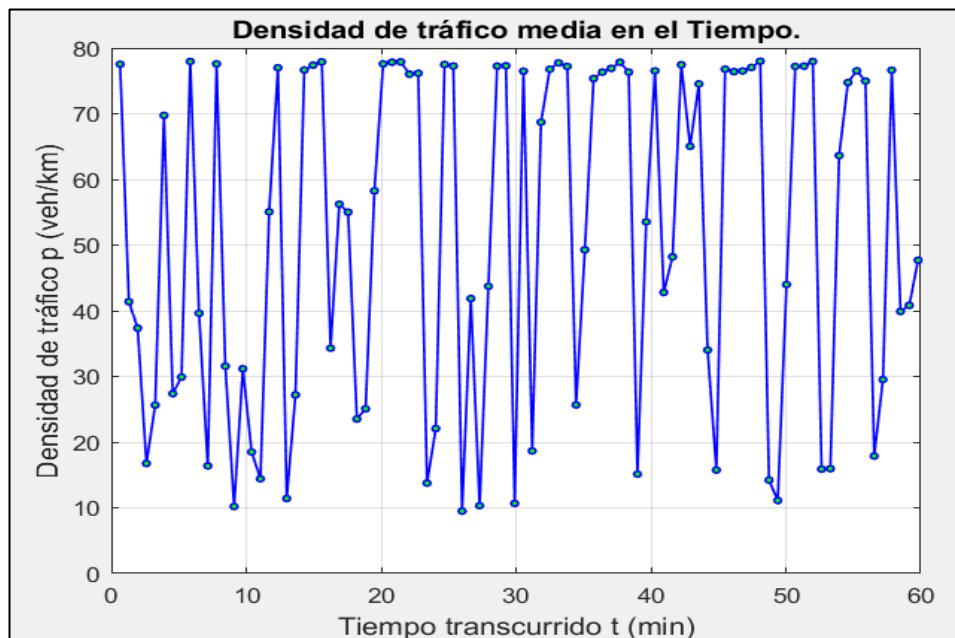
**Gráfico 4-15.** Simulación de los flujos de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB. Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Dentro de las gráficas obtenidas, es de relevancia mostrar la acumulación de autos que circulan por cada subtramo en el lapso total de la simulación, que es de 60 minutos. De esta manera se puede conocer el flujo de autos que atraviesa cada subtramo. En el caso particular del evento simulado del Gráfico 4-16, se aprecia que el total de autos  $q_5$  que pasarían por el subtramo AB sería de 248 vehículos por hora.



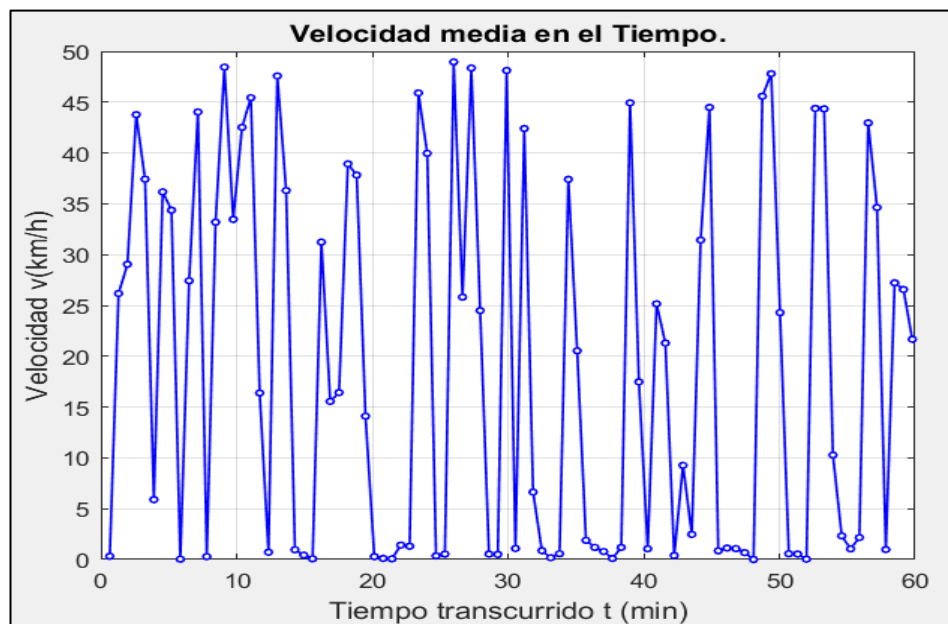
**Gráfico 4-16.** Simulación del flujo  $q_5$  de vehículos en una hora, subtramo AB.  
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-17 se indican las densidades de tráfico medias que se obtendrían en los N eventos simulados, que para el caso del subtramo AB, son 92. Se aprecia que existe una fluctuación de los valores según el evento simulado.



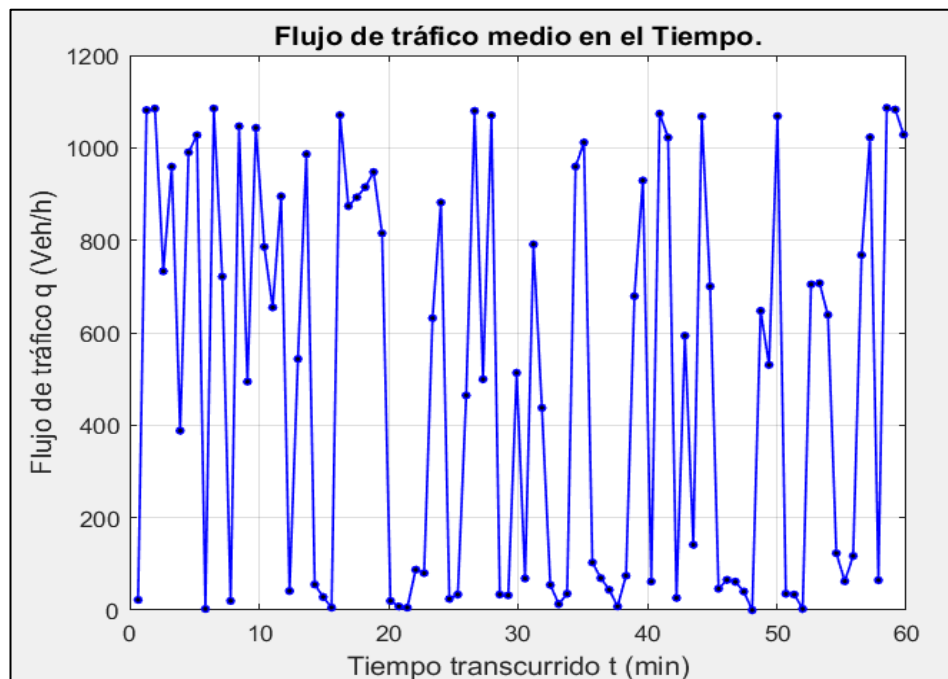
**Gráfico 4-17.** Densidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB.  
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

De igual manera, se representan las velocidades medias a las que circularían los autos en los N eventos simulados en 1 hora, conforme se observa en el Gráfico 4-18:



**Gráfico 4-18.** Velocidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB.  
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Finalmente se representan los flujos de tráfico medios a los que circularían los autos en los N eventos simulados en 1 hora, conforme se observa en el Gráfico 4-19:



**Gráfico 4-19.** Flujos de tráfico medios por evento en una hora, subtramo AB.  
Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo BC

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal de Greenshields para el caso del subtramo BC se resumen a continuación:

**Tabla 4-13.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BC.

<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 47.37 - 0.5322 \cdot \rho$
Longitud del subtramo*	L	0.180 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 40$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max}$	89 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max}$	47.37 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	60 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	2 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	28 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-89) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-47.37) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Densidades de tráfico medias de los N eventos	$p_{prom}$	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	$v_{prom}$	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	$q_{\max}$	Número (veh/h).

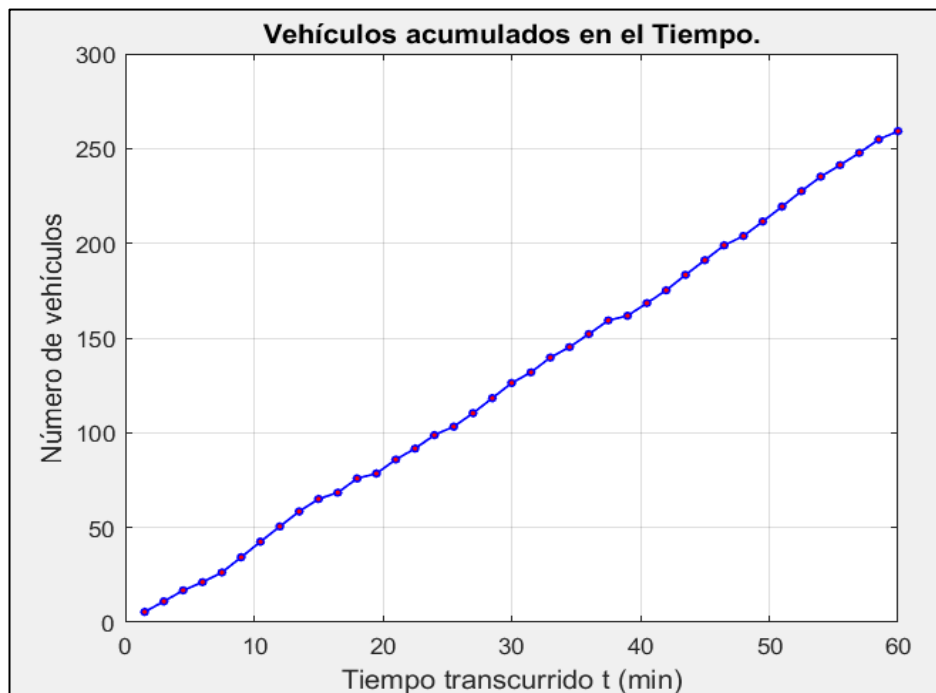


Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q5)	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q13	q13.mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-20 se presenta la acumulación de autos que circulan por cada subtramo en el lapso total de la simulación, que es de 60 minutos. En el caso particular del evento simulado, se aprecia que el flujo total  $q_{13}$  de autos que pasarían por el subtramo AB sería de 259 vehículos por hora.



**Gráfico 4-20.** Simulación del flujo  $q_{13}$  de vehículos en una hora, subtramo BC.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo CB

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal de Greenshields para el caso del subtramo CB se resumen a continuación:

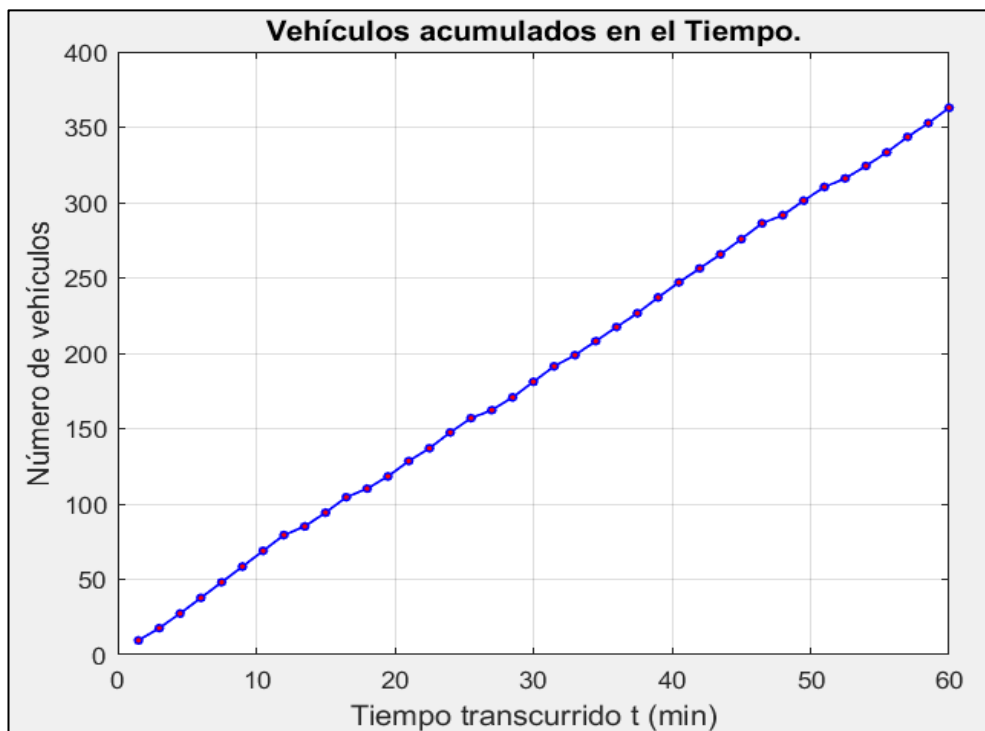
**Tabla 4-14.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo CB.

<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 60 - 0.9524 \cdot \rho$
Longitud del subtramo*	L	0.175 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 40$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max}$	63 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max}$	60 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	48 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	2 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	40 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-63) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-60) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Densidades de tráfico medias de los N eventos	$p_{prom}$	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	$v_{prom}$	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	$q_{\max}$	Número (veh/h).

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>14</sub>	q <sub>14</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

En el Gráfico 4-21 se presenta la acumulación de autos que circulan por cada subtramo en el lapso total de la simulación, que es de 60 minutos. En el caso particular del evento simulado, se aprecia que el flujo total q<sub>14</sub> de autos que pasarían por el subtramo CB sería de 363 vehículos por hora.



**Gráfico 4-21.** Simulación del flujo q<sub>14</sub> de vehículos en una hora, subtramo CB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo BA

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal de Greenshields para el caso del subtramo BA se resumen a continuación:

**Tabla 4-15.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BA.

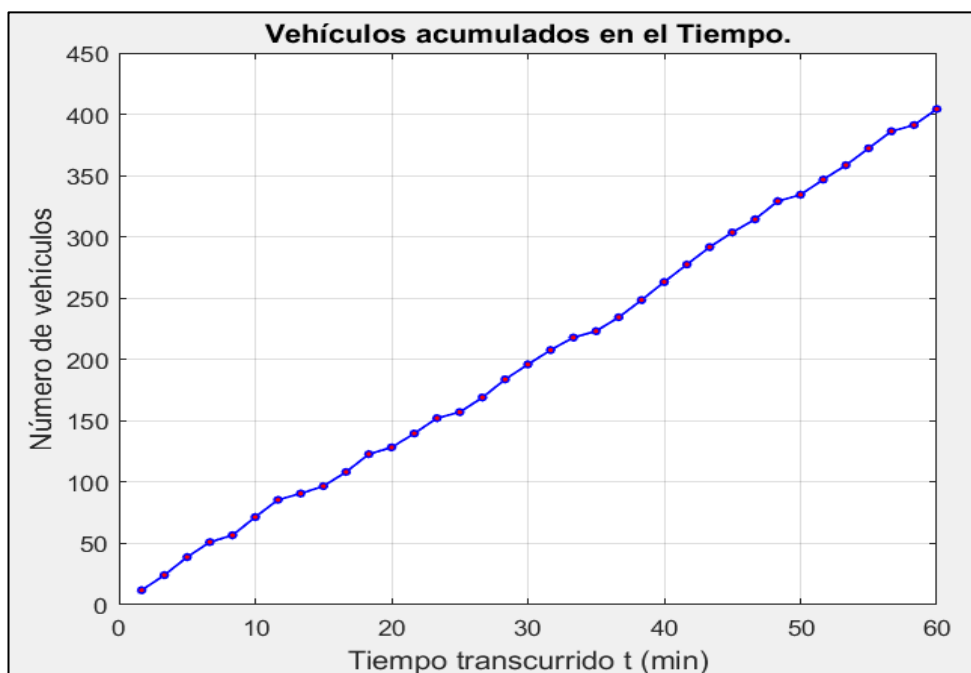
<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 54.31 - 0.5076 \cdot \rho$
Longitud del subtramo*	L	0.140 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 36$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max}$	107 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max}$	54.31 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	60 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	3 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	37 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-107) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-54.31) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Densidades de tráfico medias de los N eventos	$p_{prom}$	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	$v_{prom}$	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	$q_{\max}$	Número (veh/h).

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>6</sub>	q <sub>6</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-22 se presenta la acumulación de autos que circulan por cada subtramo en el lapso total de la simulación, que es de 60 minutos. En el caso particular del evento simulado, se aprecia que el flujo total q<sub>6</sub> de autos que pasarían por el subtramo BA sería de 403 vehículos por hora.



**Gráfico 4-22.** Simulación del flujo q<sub>6</sub> de vehículos en una hora, subtramo BA.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

#### 4.2.2 Simulación del modelo LWR con la función real a partir de regresión lineal

La simulación del tráfico vehicular permitió la determinación de las posiciones y tiempos dentro de cada uno de los subtramos, para lo cual se aplicó la ecuación del modelo LWR (ecuación 51). En cada simulación se genera una matriz de datos de espacio  $x$  y tiempo  $t$  a partir de la que se obtienen los flujos de tráfico, las velocidades y los flujos. Con la finalidad de tomar en cuenta los tiempos de semaforización que actualmente se encuentran vigentes, se procedió a generar un número de eventos  $N$  producidos en un lapso de tiempo de una hora reloj. La cantidad de eventos se obtuvo de la relación del tiempo total de 1 hora sobre la suma de los tiempos de duración de las luces amarilla, verde y rojo del semáforo. Adicionalmente se generaron valores aleatorios de densidad y velocidad iniciales, como punto de partida de la simulación acumulativa de la solución numérica del modelo LWR. Análogo al caso anterior, la solución del problema requirió la consideración de la función de la velocidad a partir de la densidad de tráfico, pero ahora mediante el establecimiento de funciones lineales obtenidas de la regresión de los datos recopilados durante el estudio de campo, lo que corresponde al modelo real. La codificación correspondiente para la solución del problema en el software se muestra en el Anexo C del presente documento. Los resultados obtenidos de la simulación se resumen a continuación:

##### Subtramo AB

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal obtenida de la regresión para el caso del subtramo AB se resumen a continuación:

**Tabla 4-16.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo AB.

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Función	$v(\rho)$	$v = 50.18 - 0.3066 \cdot \rho$
Intercepto de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico	$\beta_0$	50.18

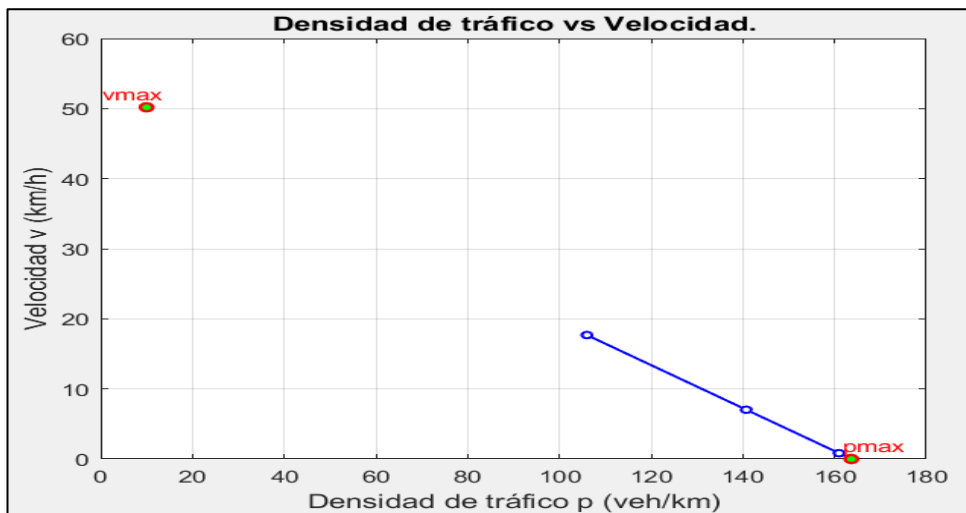
<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Pendiente de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.	$\beta_1$	-0.3066
Longitud del subtramo*	L	0.155 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 92$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{max} = -\beta_0/\beta_1$	164 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{max} = \beta_0$	50.18 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	17 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	3 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	19 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-164) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-50.18) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Densidades de tráfico medias de los N eventos	$p_{prom}$	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	$v_{prom}$	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	$q_{max}$	Número (veh/h).
Flujos de tráfico medios de los N eventos	$q_{prom}$	Vector [1 x N] (veh/h).

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>5</sub>	q <sub>5</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-23 se presenta la simulación de densidades de tráfico versus velocidades en el último evento generado en el subtramo AB (evento 92). También constan en el gráfico los valores mínimo y máximo de ambas variables. Se identifica que las velocidades oscilaron en un rango de 0 a 18 km/h, debido a que la densidad de tráfico fue cercana al valor máximo, lo que origina que se presente una congestión de tráfico.



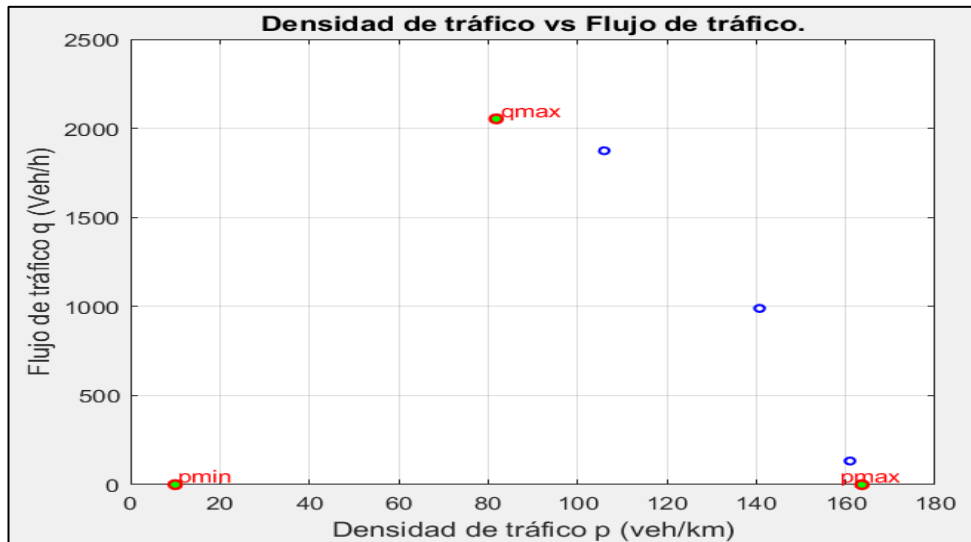
**Gráfico 4-23.** Simulación de las densidades de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el Gráfico 4-24 se presenta la simulación de las densidades de tráfico versus flujo en el último evento generado en el subtramo AB (evento 92). Adicionalmente se muestran los valores máximos de la densidad y flujo. Cabe destacar que en el caso

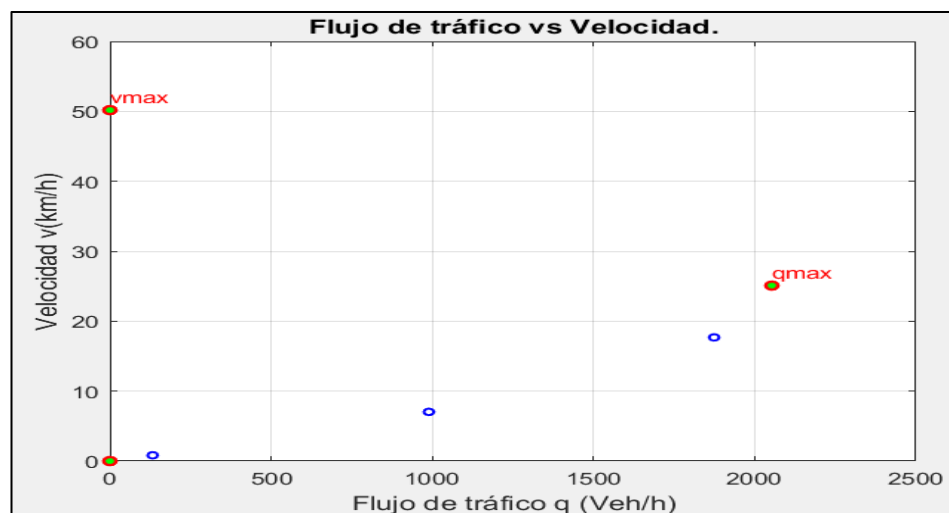


mostrado, se observa que los vehículos se encontrarían en la región de congestión, debido a que las densidades de tráfico son altas, lo que influenciaría en que se limite la libre circulación de los autos.



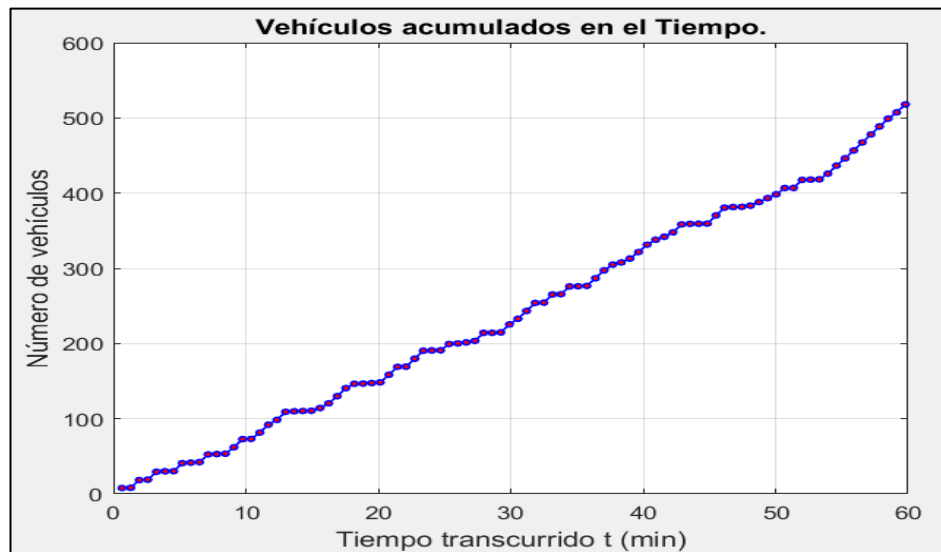
**Gráfico 4-24.** Simulación de las densidades de tráfico vs flujo, evento 92 subtramo AB. Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Por otra parte, en el Gráfico 4-25, consta la simulación de los flujos de tráfico versus las velocidades del último evento del subtramo AB. Se indican también los valores máximos de ambas variables. En el evento mostrado se aprecia que los vehículos van disminuyendo el flujo de tráfico debido a que se presenta congestión vehicular, lo que empieza a ralentizar la velocidad de circulación.



**Gráfico 4-25.** Simulación de los flujos de tráfico vs velocidad, evento 92 subtramo AB. Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

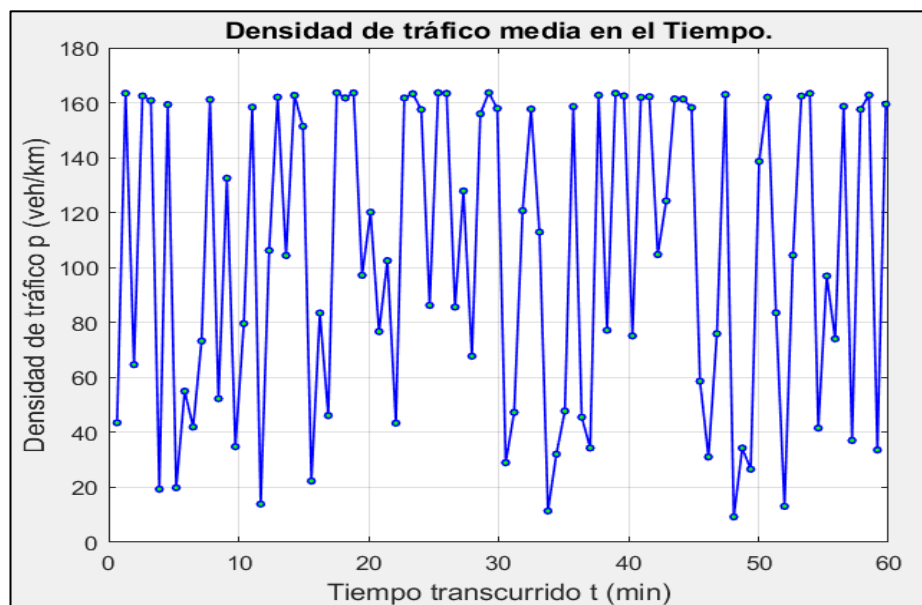
En el caso particular del evento simulado, según el Gráfico 4-26 el total de autos  $q_5$  que pasarían por el subtramo AB en 60 minutos sería de 518.



**Gráfico 4-26.** Simulación del flujo  $q_5$  de vehículos en una hora, subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

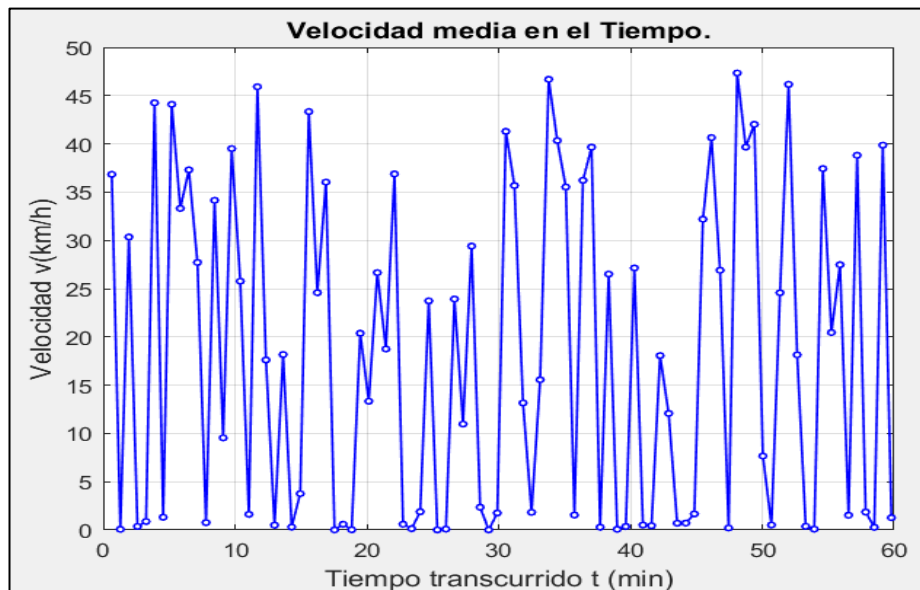
En el Gráfico 4-27 se indican las densidades de tráfico medias que se obtendrían en los N eventos simulados, que para el caso del subtramo AB, son 92. Se aprecia que existe una fluctuación de los valores según el evento simulado.



**Gráfico 4-27.** Densidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

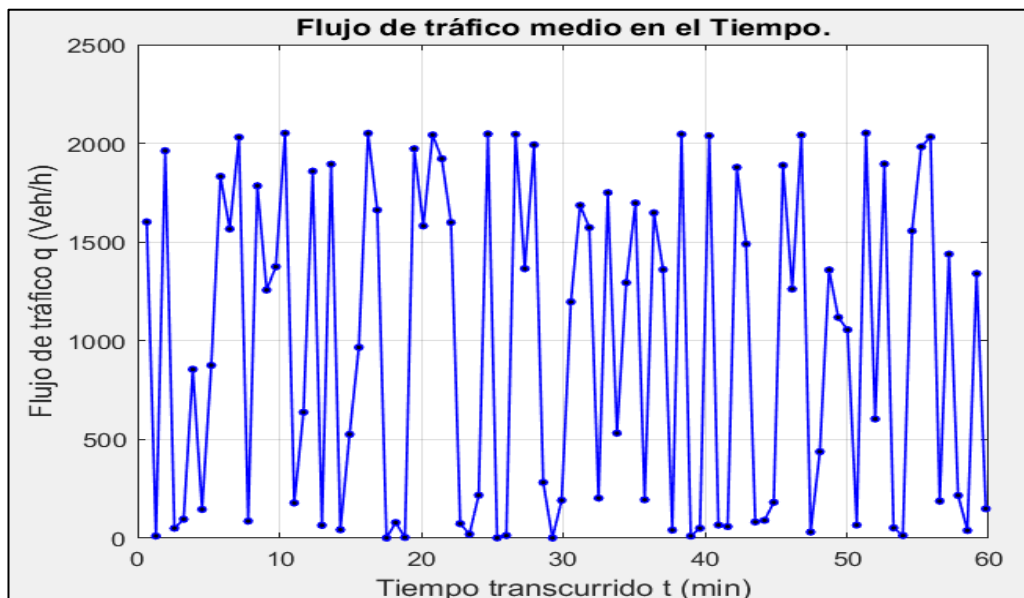
De manera similar, se representan las velocidades medias a las que circularían los autos en los N eventos simulados en 1 hora, conforme se observa en el Gráfico 4-18:



**Gráfico 4-28.** Velocidades de tráfico medias por evento en una hora, subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Adicionalmente se representan los flujos de tráfico medios a los que circularían los autos en los N eventos simulados en 1 hora, conforme se observa en el Gráfico 4-29:



**Gráfico 4-29.** Flujos de tráfico medios por evento en una hora, subtramo AB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo BC

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal obtenida de la regresión para el caso del subtramo BC se resumen a continuación:

**Tabla 4-17.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BC.

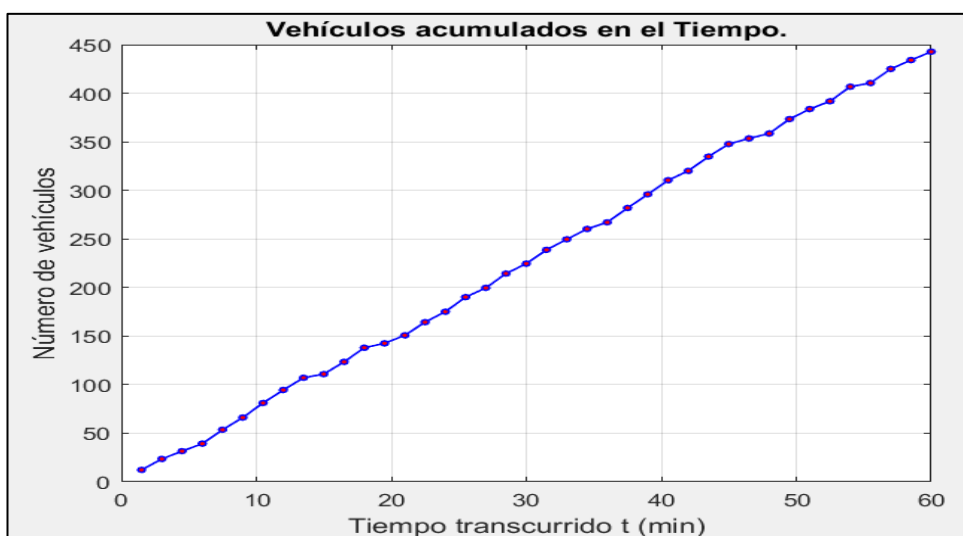
<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 46.64 - 0.2813 \cdot \rho$
Intercepto de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico	$\beta_0$	46.64
Pendiente de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.	$\beta_1$	-0.2813
Longitud del subtramo*	L	0.180 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 40$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max} = -\beta_0/\beta_1$	166 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max} = \beta_0$	46.64 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	60 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	2 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	28 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	kir	Número aleatorio en el rango (10-166) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	vir	Número aleatorio en el rango (18-46.64) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Densidades de tráfico medias de los N eventos	pprom	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	vprom	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	qmax	Número (veh/h).
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>13</sub>	q <sub>13</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el caso particular del evento simulado, según el Gráfico 4-30 el total de autos q<sub>13</sub> que pasarían por el subtramo BC en 60 minutos sería de 448.



**Gráfico 4-30.** Simulación del flujo q<sub>13</sub> de vehículos en una hora, subtramo BC.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo CB

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal obtenida de la regresión para el caso del subtramo CB se resumen a continuación:

**Tabla 4-18.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo CB.

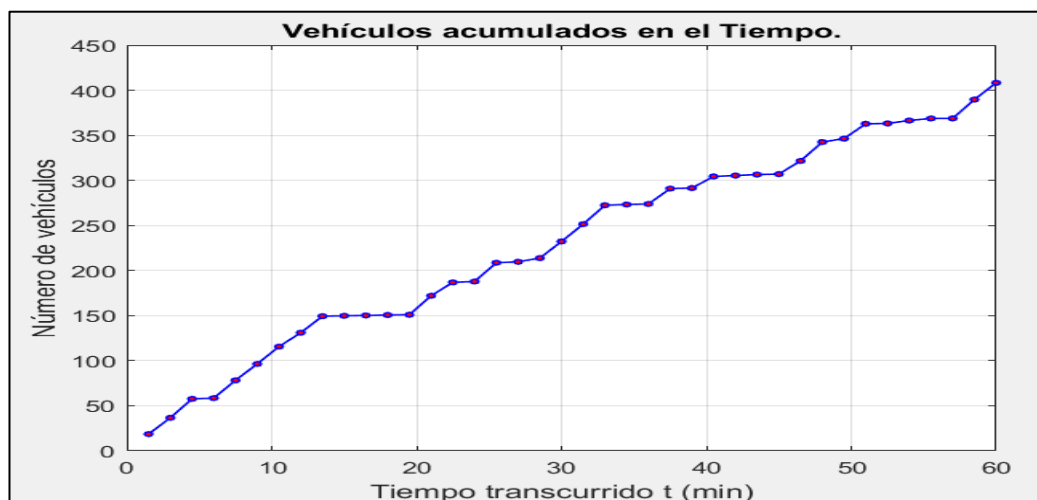
<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 57.12 - 0.4308 \cdot \rho$
Intercepto de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico	$\beta_0$	57.12
Pendiente de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.	$\beta_1$	-0.4308
Longitud del subtramo*	L	0.175 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 40$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max} = -\beta_0/\beta_1$	133 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max} = \beta_0$	57.12 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	48 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	2 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	40 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-133) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-57.12) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>

Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Densidades de tráfico medias de los N eventos	pprom	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	vprom	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	qmax	Número (veh/h).
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>14</sub>	q <sub>14</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el evento simulado, según el Gráfico 4-31 el total de autos q<sub>14</sub> que pasarían por el subtramo BC en 60 minutos sería de 408.



**Gráfico 4-31.** Simulación del flujo q<sub>14</sub> de vehículos en una hora, subtramo CB.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

## Subtramo BA

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo LWR con la función lineal obtenida de la regresión para el caso del subtramo BA se resumen a continuación:

**Tabla 4-19.** Parámetros para la simulación del modelo LWR, subtramo BA.

<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>
Función	$v(\rho)$	$v = 48.82 - 0.3089 \cdot \rho$
Intercepto de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico	$\beta_0$	48.82
Pendiente de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.	$\beta_1$	-0.3089
Longitud del subtramo*	L	0.140 km.
Número de eventos en una hora	N	$\frac{T}{T_v + T_a + T_r} = 36$
Número de subintervalos de espacio	n	10.
Número de subintervalos de tiempo	m	20.
Densidad de tráfico mínima	$\rho_{\min}$	10 veh/km.
Densidad de tráfico máxima	$\rho_{\max} = -\beta_0/\beta_1$	158 veh/km.
Velocidad mínima	$v_{\min}$	18 km/h.
Velocidad máxima	$v_{\max} = \beta_0$	48.82 km/h.
Intervalo de tiempo del semáforo en rojo	$T_r$	60 s.
Intervalo de tiempo semáforo en amarillo	$T_a$	3 s.
Intervalo de tiempo semáforo en verde	$T_v$	37 s.
Densidad inicial randómica en el rango establecido	$k_{ir}$	Número aleatorio en el rango (10-158) veh/km.
Velocidad inicial randómica en el rango establecido	$v_{ir}$	Número aleatorio en el rango (18-48.82) km/h.
<b>Parámetros de salida</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor / Salida</b>

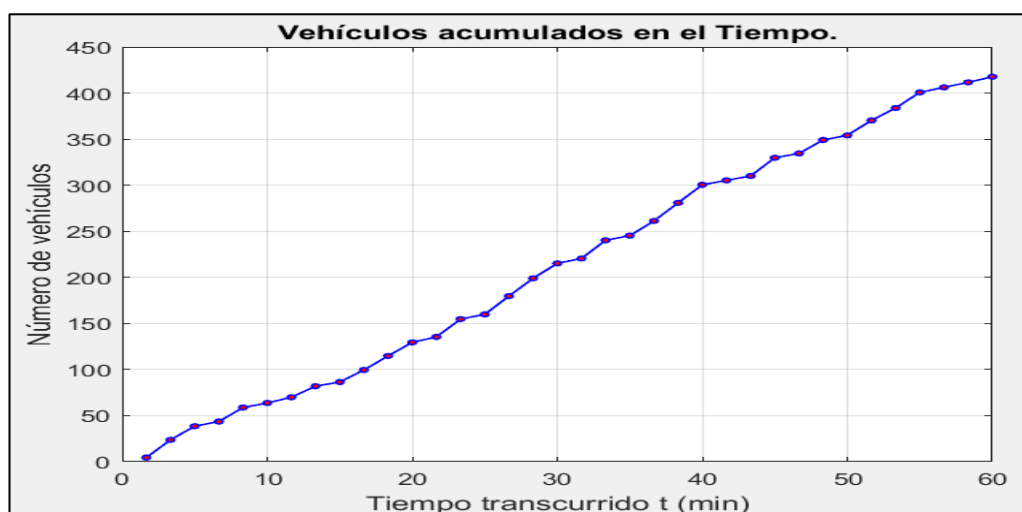


Parámetros de entrada		
Parámetro	Nomenclatura	Valor / Salida
Densidades de tráfico medias de los N eventos	pprom	Vector [1 x N] (veh/km).
Velocidades medias de los N eventos	vprom	Vector [1 x N] (km/h).
Flujos de tráfico vehicular en cada uno de los N eventos	q	Matrix [n x m] (veh/h).
Flujo de tráfico máximo de todos los N eventos	qmax	Número (veh/h).
Flujos de tráfico medios de los N eventos	qprom	Vector [1 x N] (veh/h).
Conteo de los vehículos que pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo $dt$ en los N eventos	vehiculos	Vector [1 x N] (veh).
Flujo total de vehículos que atraviesan el subtramo AB en una hora.	vehT (q <sub>5</sub> )	Número (veh/h).
Tiempo acumulado entre los N eventos	Tacum	Vector [1 x N] (min).
Archivo “.mat” que almacena el flujo q <sub>6</sub>	q <sub>6</sub> .mat	Archivo .mat

\* Este parámetro es fijo y no puede ser modificado.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

En el evento simulado, según el Gráfico 4-32 el total de autos q<sub>6</sub> que pasarían por el subtramo BA en 60 minutos sería de 418.



**Gráfico 4-32.** Simulación del flujo q<sub>6</sub> de vehículos en una hora, subtramo BA.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

### 4.2.3 Simulación del flujo de tráfico

La simulación del flujo de tráfico se realizó tomando como referente las probabilidades de ocurrencia de cada una de las salidas en función de los flujos de entrada presentados, considerando la ecuación (18). En este sentido, se crearon en las entradas flujos de tráfico aleatorios en el rango de valores establecidos por el estudio de campo realizado y cuyos datos se muestran en las Tablas 4-1, 4-2 y 4-3. A continuación se detallan los parámetros considerados para la simulación correspondiente:

**Tabla 4-20.** Parámetros para la simulación del flujo de tráfico.

<b>Flujos de tráfico</b>	<b>Criterio para la simulación</b>
q <sub>1</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>3</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>10</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>11</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>16</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>17</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>19</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>22</sub>	Generado aleatoriamente en el rango establecido según el día y la hora (veh/h).
q <sub>5</sub>	Obtenido de la simulación de tráfico a partir del modelo LWR (veh/h).
q <sub>6</sub>	Obtenido de la simulación de tráfico a partir del modelo LWR (veh/h).
q <sub>13</sub>	Obtenido de la simulación de tráfico a partir del modelo LWR (veh/h).
q <sub>14</sub>	Obtenido de la simulación de tráfico a partir del modelo LWR (veh/h).
q <sub>2</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>4</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>7</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).

Flujos de tráfico	Criterio para la simulación
q <sub>8</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>9</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>12</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>15</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>18</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>20</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).
q <sub>21</sub>	Calculado con base en la probabilidad de ocurrencia a partir de los datos de entrada (veh/h).

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

La codificación se llevó a cabo tomando en cuenta, en primer lugar, la necesidad de obtener las probabilidades de ocurrencia de los flujos de salida en función de los flujos de entrada observados. En la Figura 4-1 se presenta una captura de pantalla de la codificación utilizada:

```

57
58 % Probabilidad de los flujos de salida observados:
59 - pq2=q2_obs/Salida_obs;
60 - pq4=q4_obs/Salida_obs;
61 - pq7=q7_obs/Salida_obs;
62 - pq9=q9_obs/Salida_obs;
63 - pq12=q12_obs/Salida_obs;
64 - pq18=q18_obs/Salida_obs;
65 - pq20=q20_obs/Salida_obs;
66 - pq21=q21_obs/Salida_obs;
67
68 - fprintf('La probabilidad de q2 es %.5f.\n',pq2)
69 - fprintf('La probabilidad de q4 es %.5f.\n',pq4)
70 - fprintf('La probabilidad de q7 es %.5f.\n',pq7)
71 - fprintf('La probabilidad de q9 es %.5f.\n',pq9)
72 - fprintf('La probabilidad de q12 es %.5f.\n',pq12)
73 - fprintf('La probabilidad de q18 es %.5f.\n',pq18)
74 - fprintf('La probabilidad de q20 es %.5f.\n',pq20)
75 - fprintf('La probabilidad de q21 es %.5f.\n',pq21)

```

**Figura 4-1.** Programación de la probabilidad de los flujos de salida observados.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Una vez que se cuentan con las probabilidades, se procedió a configurar la generación de datos aleatorios en los rangos establecidos por el estudio realizado, conforme se muestra en la Figura 4-2:

```

88 %=====
89 % DATOS A SER CALCULADOS
90 % Flujo de vehículos que ingresarán al sistema:
91 fprintf('\nINGRESE LOS SIGUIENTES DATOS:\n')
92 Dia=input('Ingrese el día:', 's');
93 if (Dia=='L') || (Dia=='M') || (Dia=='M') || (Dia=='J') || (Dia=='V')
94     Hora=input('Ingrese la hora:', 's')
95     if Hora=='08:30'
96         q1=randsrc(1,1,[630:936]);
97         q3=randsrc(1,1,[30:75]);
98         q10=randsrc(1,1,[12:19]);
99         q11=randsrc(1,1,[0:25]);
100        q16=randsrc(1,1,[72:122]);
101        q17=randsrc(1,1,[162:244]);
102        q19=randsrc(1,1,[103:153]);
103        q22=randsrc(1,1,[522:702]);
104    elseif Hora=='11:00'
105        q1=randsrc(1,1,[786:960]);
106        q3=randsrc(1,1,[108:205]);
107        q10=randsrc(1,1,[0:37]);
108        q11=randsrc(1,1,[0:121]);
109        q16=randsrc(1,1,[73:112]);
110        q17=randsrc(1,1,[175:249]);
111        q19=randsrc(1,1,[0:200]);
112        q22=randsrc(1,1,[528:762]);
113    elseif Hora=='13:30'

```

**Figura 4-2.** Programación de la generación de datos aleatorios del flujo de vehículos que ingresan al sistema.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

A continuación se calcularon los flujos predichos para el sistema, mediante utilización de las probabilidades y los datos aleatorios generados para los flujos de entrada. En el caso de los flujos obtenidos del modelo LWR,  $q_5$ ,  $q_6$ ,  $q_{13}$  y  $q_{14}$ , éstos datos se incorporan directamente al script de los flujos de tráfico, mediante lectura de los archivos “.mat” generados del script de simulación de tráfico con el modelo LWR. En la Figura 4-3 se muestra la codificación correspondiente:

```

200 % Salidas de vehículos predichas:
201 q2=pq2*Entrada;
202 q4=pq4*Entrada;
203 q7=pq7*Entrada;
204 q9=pq9*Entrada;
205 q12=pq12*Entrada;
206 q18=pq18*Entrada;
207 q20=pq20*Entrada;
208 q21=pq21*Entrada;
209
210 fprintf('\nFLUJOS DE SALIDA ESTIMADOS:\n')
211 fprintf('El flujo q2 de vehículos que saldrán desde la intersección A,\n por la av. Manuelita Sáenz
212 fprintf('El flujo q4 de vehículos que saldrán desde la intersección A,\n por la calle Pío de Baroja
213 fprintf('El flujo q7 estimado de vehículos que ingresarán al Paseo Shopping será: %.0f.\n',q7)
214 fprintf('El flujo q9 de vehículos que saldrán desde la intersección B,\n por la calle Miguel Delibes
215 fprintf('El flujo q12 de vehículos que saldrán desde la intersección B,\n por la calle Miguel Delibes
216 fprintf('El flujo q18 de vehículos que saldrán desde la intersección C,\n por la av. Antonio Clavijero
217 fprintf('El flujo q20 de vehículos que saldrán desde la intersección C,\n por la av. Antonio Clavijero
218 fprintf('El flujo q21 de vehículos que saldrán desde la intersección C,\n por la av. Manuelita Sáenz
219
220 % Flujo de vehículos en el interior de los subtramos:
221 % Subtramo A-B
222 load('q5.mat','q5');
223 q5=q5;
224 q8=q5-q7;
225 load('q6.mat','q6');

```

**Figura 4-3.** Programación de los flujos de vehículos que salen del sistema.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Por último se llevó a cabo una simulación con la codificación establecido y se despliegan los flujos de salida del sistema, tal como se muestra en la Figura 4-4 mostrada a continuación:

```
INGRESE LOS SIGUIENTES DATOS:
Ingrese el día:S
Ingrese la hora:17:00

Hora =

    '17:00'

Entrada =

    2345

El total de vehículos que ingresan al sistema es 2345.0.

FLUJOS DE SALIDA ESTIMADOS:
El flujo q2 de vehículos que saldrán desde la intersección A,
por la av. Manuelita Sáenz sentido Sur-Norte se estima en: 717.
El flujo q4 de vehículos que saldrán desde la intersección A,
por la calle Pío de Baroja se estima en: 113.
El flujo q7 estimado de vehículos que ingresarán al Paseo Shopping será: 147.
El flujo q9 de vehículos que saldrán desde la intersección B,
por la calle Miguel Delibes sentido Este-Oeste se estima en: 11.
El flujo q12 de vehículos que saldrán desde la intersección B,
por la calle Miguel Delibes sentido Oeste-Este se estima en: 77.
El flujo q18 de vehículos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Antonio Clavijo sentido Este-Oeste se estima en: 211.
El flujo q20 de vehículos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Antonio Clavijo sentido Oeste-Este se estima en: 255.
El flujo q21 de vehículos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Manuelita Sáenz sentido Norte-Sur se estima en 815.
```

**Figura 4-4.** Flujo de vehículos a la salida del sistema en una simulación aleatoria.

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

### 4.3 Discusión

De la revisión de los estudios similares realizados previamente y su contraste con el presente estudio se establecen las siguientes observaciones:

En el estudio desarrollado por Torres-Vega (2012) acerca de la “Simulación del tráfico en una vía expresa y análisis estadístico de los resultados”, el autor concluyó que al existir congestión vehicular se incrementan los tiempos de viaje de los vehículos, la variación suele representar una disminución del 8% de la velocidad de los autos. En el caso de las situaciones crítica, el investigador planteó dos escenarios, una situación crítica y una crítica controlada, en la primera no se tiene control de la situación real y en la segunda se tomaron alternativas de cierre de una salida lateral del tramo de estudio, con lo cual consiguió elevar la cantidad de autos promedio que circulan y la cantidad máxima que puede alijar el sistema, sin que la velocidad de circulación se vea

afectada. En el presente estudio las condiciones no fueron las mismas, ya que no se contó con la posibilidad de alterar los ingresos y salidas del sistema, únicamente se cuenta con la posibilidad de modificar los tiempos de semaforización, para determinar el efecto que tienen en el congestionamiento de tráfico. Sin embargo, se constató que efectivamente un incremento del flujo de tráfico puede ocasionar congestionamientos vehiculares y esto limita la velocidad a la que pueden transitar los automotores en el interior del sistema vial.

Pérez et al. (2014) en su trabajo denominado “Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico”, los investigadores concluyen que para brindar alternativas viables al flujo de tráfico, se debe considerar la incorporación de medios de control de paso vehicular tales como semáforos, siempre que éstos puedan influir en que se incremente la densidad de tráfico hasta el punto de densidad crítica, de manera que se pueda alcanzar el máximo flujo global. En la presente investigación no se realizó un estudio específico destinado a la optimización de los tiempos de semaforización, por lo cual resultaría de interés que se desarrolle una investigación al respecto, la que debe tener como punto de partida los datos y la información generada en este trabajo.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las características tomadas en cuenta en cada uno de los tres modelos referenciados en la discusión:

**Tabla 4-21.** Características de los modelos para el análisis del flujo de tráfico.

Características	Modelo		
	Torres-Vega (2012)	Pérez et al. (2014)	Moyolema (2021)
Tipo de modelo	Microscópico	Macroscópico	Macroscópico
Tramos	Sí	Sí	Sí
Tiempo transcurrido	Sí	Sí	Sí
Posición	Sí	Sí	Sí
Densidad de tráfico	No	Sí	Sí
Velocidad	Sí	Sí	Sí
Flujo de tráfico	Sí	Sí	Sí
Tiempo de semaforización	Sí	No	Sí

<b>Características</b>	<b>Modelo</b>		
	Torres-Vega (2012)	Pérez et al. (2014)	Moyolema (2021)
Período de calentamiento en la simulación	Sí	No	No

Elaborado por: Moyolema, A. (2021).

Al hacer una comparación de las características, se aprecia que el modelo propuesto en el presente trabajo corresponde a un análisis particular, con base en los datos específicos del comportamiento del tráfico vehicular en la avenida Manuelita Sáenz en el tramo comprendido entre la calle Pío Baroja y avenida Antonio Clavijo, el cual consideró todos los parámetros y variables de interés que definen el comportamiento del tráfico desde el punto de vista de un modelo macroscópico. Las únicas limitaciones que tiene es que no analiza el comportamiento individual de cada uno de los conductores de los autos ni presenta un período de calentamiento para la simulación, que son características particulares que suelen describir los modelos de tipo microscópico. En este sentido, el presente modelo es viable y de utilidad para definir el comportamiento del tráfico vehicular en el tramo de estudio.

## 5. CAPÍTULO V

### 5.1 Conclusiones

- El estudio del tráfico vehicular se desarrolló considerando la existencia de cuatro subtramos dentro del sistema, con un total de 22 flujos de tráfico entre entradas, salidas e interiores. Las observaciones se ejecutaron durante dos semanas de lunes a viernes en los horarios de 08h30, 11h00, 13h30, 18h30 y 20h00; los días sábados y domingos en horario 10h00, 13h00, 17h00 y 20h00, con la finalidad de establecer diferentes escenarios que se presentan durante la restricción vehicular vigente como parte de las medidas de prevención por la crisis sanitaria.
- Con los datos recopilados se obtuvieron las medias, mínimos y máximos según el día y la hora, dichos valores sirvieron de referentes para el establecimiento de los rangos esperados de flujos de tráfico. Se identificó que la hora en la que se presentan los mayores flujos corresponde a las 18:30 en todo el tramo de estudio. El flujo de tráfico más elevado de los registrados fue  $q_1$  con 1140 vehículos/h, que corresponde a los vehículos que ingresan desde la av. Manuelita Sáenz, sentido Norte-Sur hacia la intersección A.
- Las densidades de tráfico en cada uno de los subtramos se obtuvieron mediante observación directa en el lugar de los hechos, así como las velocidades medias de recorrido realizadas por los autos. Con los valores encontrados se establecieron funciones que determinan la velocidad de los vehículos según la densidad de tráfico, mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal. En términos generales las densidades de tráfico fueron similares para los cuatro subtramos, aunque se destacan los casos de los subtramos BC y BA, con una mayor densidad. El pico máximo alcanzado fue de 16 autos por subtramo.
- Las velocidades de recorrido de los vehículos son más elevadas en el subtramo CB, cuyos picos más altos alcanzan el límite de velocidad máximo moderado de 60 km/h, es decir que exceden los 50 km/h que es lo recomendado en el perímetro urbano. Sin embargo la fluctuación de los datos es pronunciada, pudiendo ser inferior a 20 km/h. Mediante la regresión lineal se estableció que



la velocidad se puede expresar como una función de la densidad de tráfico, con un error mínimo para los cuatro modelos encontrados. El tramo que presentó la mayor fluctuación de velocidad y densidad de tráfico es el BA, lo que denota que es el más conflictivo, dado que restringe el libre flujo de autos de forma más recurrente.

- Se efectuó una simulación de las densidades de tráfico en el interior del sistema, considerando la posición y el intervalo de tiempo de los vehículos en cada subtramo. Para el efecto se utilizó el modelo macroscópico de tráfico vehicular LWR que trabaja con las densidades y velocidades. La solución requirió la aplicación de una técnica numérica, de la consideración de las condiciones de frontera y de la incorporación de la función lineal que define la relación de la velocidad y densidad de tráfico obtenida del modelo de regresión. Para hallar los flujos fue necesario incorporar la ecuación fundamental del tráfico que relaciona las tres magnitudes: densidad, velocidad y flujo. Se efectuaron N simulaciones en un lapso de una hora, tomando en cuenta los tiempos de semaforización, teniendo presente que los autos circulan cuando la luz se encuentra en verde. Cada simulación representa un evento y al final se contabilizaron los autos que circularían durante los 60 minutos, lo cual se expresa como el flujo de autos que pasan por el interior del sistema.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se sugiere efectuar un estudio con un mayor número de observaciones de flujos de tráfico, en un horario más extendido y que se realice cuando las condiciones de la emergencia sanitaria se hayan minimizado, ya que el presente estudio se efectuó entre los meses de septiembre y noviembre del año 2020, cuando existían restricciones de la circulación vehicular.
- Con la finalidad de particularizar el comportamiento de cada uno de los vehículos, se recomienda la ejecución de un estudio con un modelo microscópico, que sirva de complemento al presente estudio y que permita contrastar los resultados alcanzados.

- Se aconseja modificar los tiempos de semaforización con la finalidad de determinar el impacto que tendría en la densidad de tráfico dentro de cada subtramo.
- Se sugiere que el presente estudio se pueda llevar a cabo en otros sectores de la ciudad, para conocer el comportamiento del tráfico vehicular y poder brindar alternativas de solución a los mismos.

## **Glosario**

**Densidad.** Es la relación que se establece entre el número de vehículos y la longitud del espacio o tramo en el que circulan los mismos, también se puede obtener a partir de la división entre el flujo y la velocidad media de los vehículos (Treiber & Kesting, 2013, pp. 17-18).

**Distribución Gaussiana.** Es una distribución de densidad de probabilidad de una variable aleatoria continua, obtenida a partir de un conjunto de valores numéricos, en el que se genera una curva simétrica que se extiende a través de un campo de variabilidad infinito, el valor de la media se encuentra en el centro de dicha curva (Martínez-Bencardino, 2012, pp. 247-249).

**Flujo.** Es la relación que se establece entre el número de vehículos que atraviesan una determinada sección transversal y el intervalo de tiempo en el que se contabilizan los vehículos en dicha sección (Treiber & Kesting, 2013, pp. 17-18).

**Período de calentamiento.** Es el lapso durante el que un sistema aún no alcanza la estabilidad en cuanto a la predicción o detección de los valores de un determinado indicador, por lo cual es necesario que los valores outputs del sistema se supriman de las estadísticas generales, para evitar una distorsión los resultados de los indicadores (Torres-Vega, 2012, p. 51).

**Teoría de colas.** Una cola es un sistema que comprende varios recursos y una determinada línea de espera, en la que las peticiones o solicitudes de un conjunto de usuarios permanecen aguardando a que alguno de los recursos quede disponible para ser atendidos (Yáñez-Mingot & Hernández-Gutiérrez, 2020, p. 65).

## Bibliografía

- Alcalá-Ramos, M. A. (2016). *Micro Simulación del tráfico de la intersección de las avenidas Bolívar, Córdova y calle Andalucía empleando el software Vissim 6* [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Aldás-Sánchez, M. (2015). *Modelo para la expansión de la capacidad de tráfico* [Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos]. <https://ciencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/13764/Tesis%20Milton%20Aldas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Almarza, D. (2015). *Evaluación del programa de simulación NETLOGO como herramienta motivadora y eficaz para trabajar destrezas científicas* [Tesis de Masterado]. Universidad Complutense de Madrid.
- Ayala, A., Verónica. (2012). *Simulación de tráfico en el tramo de la Av. Interoceánica comprendido entre la calle González Suárez y Francisco Pizarro* [Posgrado]. San Francisco de Quito.
- Bazghandi, A. (2012). Techniques, Advantages and Problems of Agent Based Modeling for Traffic Simulation. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(1), 115-119.
- Cabrera-Ramírez, A. G. (2013). *Simulación de tráfico en el centro de la ciudad de León* [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/6164/1/223845.pdf>
- Camacho, J., Medina, S., & Terán, O. (2012). *Simulación del tráfico de autos en una intersección: Desde la perspectiva de una plataforma multiagente*. (N.º 2). 33(2), 85-94.
- Campoverde, I. (2017). *Modelado de tráfico vehicular en avenidas a partir de datos estadísticos* [Posgrado]. Politécnica Salesiana.
- Cao, H., & Luo, J. (2019). Research on VISSIM-MATLAB Integrated Traffic Simulation Platform Based on COM Interface Technology. *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 305-309. <https://doi.org/978-1-5386-6243-4>
- Carpio, R. (2020). *Análisis de tráfico vehicular en la avenida 25 de junio junto al Paseo Shopping en la ciudad de Machala* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Machala].

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/15407/1/ECFIC-2020-IC-DE-00006.pdf>

- Challenger, I., Díaz, Y., & Becerra, R. (2014). El lenguaje de programación Python/The programming language Python. *Ciencias Holguín*, XX(2), 1-13.
- Chaves-Pinzón, C. A. (2016). *Simulación de escenarios de tráfico vehicular para la ciudad de Bogotá* [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Dirección de Tránsito del Municipio de Ambato. (2015). *Plan Maestro de Transporte y Movilidad del Cantón Ambato*.
- Dominguez, P., & Cortínez, V. (2016). Un enfoque de optimización para el control de semáforos. *Congreso de Ingeniería del Transporte València*, 15. <https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.4995/CIT2016.2016.2262>
- Elosua, P. (2011). *Introducción al entorno R* (1.<sup>a</sup> ed.). Universidad del País Vasco. <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/pdf/UWLGPS4979.pdf>
- García-Sabater, J. (2016). *Aplicando Teoría de Colas en Dirección de Operaciones* (1.<sup>a</sup> ed.). ed.). <http://personales.upv.es/jpgarcia/linkedddocuments/teoriadecolasdoc.pdf>
- Gómez, E. (2009). *Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la mejora en la sincronización de semáforos* [Posgrado]. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.
- Guarnaccia, C., Lenza, T. L., Mastorakis, N. E., & Quartieri, J. (2011). *A Comparison between Traffic Noise Experimental Data and Predictive Models Results*. 5(4), 8. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.06.004>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hernández-Vega, H. (2016). Modelo de Greenshields Un estudio de la capacidad de tráfico. *Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR*, 7(1), 5.
- Kanagaraj, V. (2013). *Evaluation of Different Vehicle Following Models Under Mixed Traffic Conditions*. 13.
- Kimms, A., & Maassen, K.-C. (2011). Optimization and simulation of traffic flows in the case of evacuating urban areas. *OR Spectrum*, 33, 571-593. <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0264-1>

- Li, L., & Chen, X. (2017). Vehicle headway modeling and its inferences in macroscopic/microscopic traffic flow theory: A survey. *Transportation Research*, 170-188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.007>
- Martínez-Bencardino, C. (2012). *Estadística y muestreo* (13.<sup>a</sup> ed.). Ecoe Ediciones.
- Mesa-Mazo, M. (2014). *Bifurcaciones en un sistema de tráfico vehicular* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52946/7911003.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mesa-Mazo, M., Valencia-Calvo, J., & Olivar-Tost, G. (2014). Model for a vehicle dynamics through a sequence of traffic lights. *Dyna*, 81(186), 138-145.
- Mikhailov, E. E. (2017). *Programming with MATLAB for scientists: A beginner's introduction*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5.<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Moore, H. (2007). *MATLAB® para ingenieros* (1.<sup>a</sup> ed.). Pearson Prentice Hall.
- Morales-Torres, F. (2012). *Simulador de tráfico en tiempo real* [Tesis de Maestría, Tecnológico de Monterrey]. <https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/629054/33068001103893.pdf?sequence=1>
- Ostertagová, E. (2012). Modelling using Polynomial Regression. *Procedia Engineering*, 48, 500-506. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.545>
- Péres, M., Ruiz, G., Nesmachnow, S., & Olivera, C. (2016). Optimización evolutiva del tráfico urbano y las emisiones vehiculares. *Programación Matemática y Software*, 8(1), 44-52.
- Perez, A. J., Dominguez, L. D., Lotito, P. A., D'Amato, J. P., & Rubiales, A. J. (2016). *Aplicación de Viterbi sobre Modelos Ocultos de Markov para la Estimación de Tráfico Vehicular*. 18.
- Pérez, F., Bautista, A., Salazar, M., & Macias, A. (2014). *Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico*. 81, 6.
- Pilamunga Poveda, E. M. P. (2015). *Modelos bayesianos de predicción y gestión de tráfico* [Doctorado]. Rey Juan Carlos.
- Portilla-Caicedo, C. R. (2014). *Desarrollo de un modelo dinámico de tráfico multimodal (automóviles, articulados, peatones y bicicletas) con fines de*

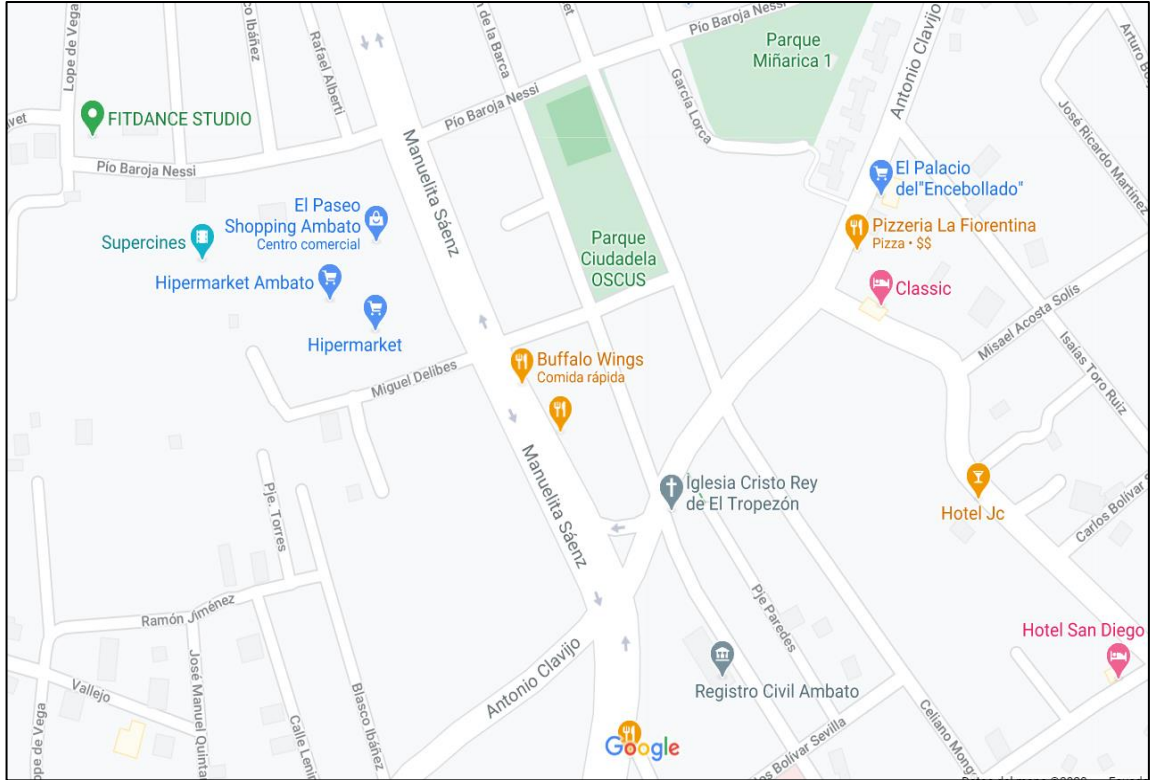
- control* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53917>
- Puerto-Hernández, S., & Forero-Forero, S. (2015). Modelo y simulación de una intersección vial usando el software Arena®. *Revista Mutis*, 5(1), 66-73.
- Ramírez-Rabelo, A. M. (2019). *Modelación Matemática del Tráfico Vehicular con el Modelo «Car-Following»*. 2-18.
- Sánchez-Cruz, L. A. (2019). *Evaluación y mejora de tres intersecciones de la avenida Canadá utilizando herramientas de Microsimulación de tráfico* [Tesis de Pregrado]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Sommer, C., Dressler, F., & Reinhard, G. (2011). Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(1), 3-15.
- Tampère, C. M. J., Corthout, R., Cattrysse, D., & Immers, L. (2011). A generic class of first order node models for dynamic macroscopic simulation of traffic flows. *Transportation Research*, 21.
- Torres-Vega, P. J. (2012). Simulación del tráfico en una vía expresa y análisis estadístico de los resultados. *Ingeniería Industrial*, 30, 45-79.
- Treiber, M., & Kesting, A. (2013). *Traffic flow dynamics: Data, models and simulation*. Springer.
- Valencia, A., & Fernández, R. (2010). Comparación entre un modelo macrocópico de corredor de transporte público y un microsimulador de tráfico. *Panam*, 16, 1-16.
- Vasqu ez, Y. M., & Laguardia, Dr. J. J. (2018). Estudio del Flujo Vehicular Mediante un Modelo de Lighthill-Whitham-Richards. *KnE Engineering*, 3(1), 449.  
<https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1449>
- Verdugo-Romero, W. (2018). *Diseño y validación de un modelo matemático para simulación de tráfico vehicular aledaño a la ruta del tranvía en el centro histórico de la ciudad de Cuenca usando autómatas celulares* [Tesis de Maestría]. Universidad Polit cnica Salesiana.
- Y a ez-Mingot, P., & Hern andez-Gutiérrez, J. (2020). *Una introducción amable a la Teoría de Colas* (1.<sup>a</sup> ed.). <http://www.it.uc3m.es/pablo/teoria-colas/introduccion-teoria-colas.pdf>

Yin, D., & Qiu, T. Z. (2011). Comparison of Macroscopic and Microscopic Simulation Models in Modern Roundabout Analysis. *Transportation Research Record*, 244-252. <https://doi.org/10.3141/2265-27>



## Anexos

### Anexo A. Zona de estudio. Tramo de la Avenida Manuelita Sáenz entre Pío Baroja y Antonio Clavijo.



**Anexo B.** Recolección de datos de la zona de estudio.



Semaforización de la intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Pío Baroja.



Intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Miguel Delibes.



Semaforización de la intersección de la avenida Manuelita Sáenz y calle Antonio Clavijo.

Anexo C. Código del Script en MATLAB versión R2018a.

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE LA DENSIDAD DE TRÁFICO**

```
% Función de la Velocidad en función de la Densidad de tráfico.

% SUBTRAMO:
% Subtramo 'AB' Manuelita Sáenz entre Pío Baroja Nessi y Miguel Delibes.
% Subtramo 'BC' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo.
% Subtramo 'CB' Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes.
% Subtramo 'BA' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío Baroja Nessi.
Subtramo=input('Ingrese el Subtramo:', 's')
if Subtramo=='AB'
    L=0.155; % Longitud del subtramo(km).
    % Densidades de tráfico tomadas por cada subtramo (Veh/subtramo).
    pst=[0 6 7 3 5 2 3 4 9 6 3 0 4 1 3 0 5 6 4 8 3 4 5 3 12 10 7
10 2 9 4 11]';
    % Densidades de tráfico equivalentes en Veh/km.
    p=pst*1/L
    % Velocidades tomadas.
    v=[54.22 35.34 36.86 41.99 40.46 43.46 41.58 44.64 32.92
39.10 44.64 55.74 46.97 51.33 41.83 52.49 38.91 37.05 41.36
32.40 41.70 38.04 44.32 38.72 30.90 31.24 39.63 30.24 44.39
30.38 39.80 28.52]';
    vp=[p v];
elseif Subtramo=='BC'
    L=0.180; % Longitud del subtramo(km).
    % Densidades de tráfico tomadas por cada subtramo (Veh/subtramo).
    pst=[4 13 4 16 9 8 2 1 9 2 5 3 10 3 1 10 8 5 4 8 4 6 5 4 8 9
6 7 0 10 5 7 2 0 9 13 7]';
    % Densidades de tráfico equivalentes en Veh/km.
    p=pst*1/L
    % Velocidades tomadas.
    v=[39.93 25.50 45.51 22.25 32.69 34.16 47.37 46.59 32.42
40.42 39.27 44.66 31.53 43.84 47.06 24.95 36.78 37.16 37.85
35.31 40.20 35.08 45.06 30.25 36.59 30.73 38.59 37.96 45.00
32.61 38.99 30.92 45.92 42.62 33.25 27.63 34.25]';
    vp=[p v];
elseif Subtramo=='CB'
    L=0.175; % Longitud del subtramo(km).
    % Densidades de tráfico tomadas por cada subtramo (Veh/subtramo).
    pst=[4 3 4 7 9 0 2 1 9 2 3 3 9 5 1 3 6 5 4 2 4 6 5 4 11 9 3
7 0 3 10 7 2 0 9 6 7]';
    % Densidades de tráfico equivalentes en Veh/km.
    p=pst*1/L;
    % Velocidades tomadas.
    v=[42.63 46.53 54.69 42.37 40.65 61.58 52.28 54.97 39.30
53.16 52.63 49.53 38.82 40.08 54.08 51.68 42.97 45.39 51.51
53.71 44.55 42.03 40.13 43.75 30.51 31.47 52.90 46.74 54.59
55.90 27.22 36.32 48.67 53.32 33.51 37.98 34.55]';
```

## CÓDIGO EN MATLAB DE LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE LA DENSIDAD DE TRÁFICO

```

vp=[p v];
elseif Subtramo=='BA'
    L=0.140; % Longitud del subtramo(km).
    % Densidades de tráfico tomadas por cada subtramo
    (Veh/subtramo).
pst=[6 3 4 10 6 11 2 6 7 4 10 4 13 8 4 3 6 5 4 2 4 6 15 4
9 10 3 0 1 3 10 5 2 0 7 8 13 7 6 1]';
    % Densidades de tráfico equivalentes en Veh/km.
    p=pst*1/L;
    % Velocidades tomadas.
v=[36.05 41.18 42.46 22.91 39.90 25.60 43.60 41.28 33.76
45.49 27.05 39.90 20.54 31.80 41.31 32.58 36.21 45.53 40.45
37.95 39.07 35.80 18.45 31.92 26.67 23.89 38.89 54.31 40.26
37.87 24.59 41.87 48.63 53.25 32.82 36.33 21.56 28.35 27.42
53.41]';
    vp=[p v];
else
    disp('Ingreso un Subtramo válido')
end

figure(1) % Densidad de tráfico vs Velocidad.
regresor=fit(p,v,'poly1') % Función lineal (primer grado).
plot(p,v,'bo',
'MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','w','LineWidth',1.5)
grid on
hold on
plot(regresor,p,v)
title('Densidad de tráfico vs Velocidad.','FontSize',12)
xlabel('Densidad de tráfico p (veh/km)', 'FontSize',12)
ylabel('Velocidad v (km/h)', 'FontSize',12)
hold off

% Ecuación de la recta Velocidad vs Densidad de tráfico:
[r_p,m_p,b_p] = regression(p(:,1),v(:,1),'one');
fprintf('La ecuación de la velocidad a partir de la densidad
vehicular \n del subtramo %s es v = %.2f +(%.4f p)
\n',Subtramo,b_p,m_p)
fprintf('La ecuación del flujo de tráfico a partir de la
densidad vehicular \n del subtramo %s es q = %.2f p +(%.4f
p^2) \n',Subtramo,b_p,m_p)

% Coeficiente de correlación de Pearson:
r=((size(p,1)*sum(p.*v))-
(sum(p,1)*sum(v,1)))/(sqrt((size(p,1)*sum(p.*p))-
(sum(p)^2))*sqrt((size(v,1)*sum(v.*v))-
(sum(v)^2)));
fprintf('El coeficiente de correlación r de Pearson es: %.5f
\n',r)

% Valores predichos del modelo:
v_pred=b_p +(m_p.*p);
% Coeficiente de determinación R^2:
R_2=1-((sum((v-v_pred).^2))/(sum((v-mean(v)).^2)));

```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE LA DENSIDAD DE TRÁFICO**

```
fprintf('El coeficiente de determinación R^2 es: %.5f\n',R_2)
% Error cuadrático medio:
MSE= ((sum((v-v_pred).^2))/(size(p,1)-1-1));
fprintf('El Error cuadrático medio MSE es: %.5f\n',MSE)
% Raíz del error cuadrático medio
RMSE= sqrt(MSE);
fprintf('La raíz del Error cuadrático medio RMSE es: %.5f\n',RMSE)
% Error porcentual absoluto medio
MAPE=(100/size(p,1))*sum(abs((v-v_pred)./v));
fprintf('El Error porcentual absoluto medio MAPE es: %.2f por ciento.\n',MAPE)
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD-VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR**

```
clear all;
warning off all;
clc;

T=1; % Tiempo total de 1 hora (3600 s).
% SUBTRAMO:
% Subtramo 'AB' Manuelita Sáenz entre Pío Baroja Nessi y Miguel Delibes.
% Subtramo 'BC' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo.
% Subtramo 'CB' Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes.
% Subtramo 'BA' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío Baroja Nessi.

Subtramo=input('Ingrese el subtramo: ','s')
if Subtramo=='AB'
Tr=17/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en rojo(h).
Ta=3/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en amarillo(h).
Tv=19/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en verde(h).
L=0.155; % Longitud del subtramo(km).
B0= 50.18 % Intercepto de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.
B1= -0.3066 % Pendiente de la ecuación que define la velocidad en función de la densidad de tráfico.
vmax=B0; % Velocidad máxima(km/h).
pmax=-B0/B1; % Densidad de tráfico máxima(veh/km).
elseif Subtramo=='BC'
Tr=60/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en rojo(h).
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD-  
VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR**

```

Ta=2/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en amarillo(h).
Tv=28/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en verde(h).
L=0.180; % Longitud del subtramo(km).
B0= 46.64 % Intercepto de la ecuacion que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
B1= -0.2813 % Pendiente de la ecuacion que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
vmax=B0; % Velocidad máxima(km/h).
pmax=-B0/B1; % Densidad de tráfico máxima(veh/km).
elseif Subtramo=='CB'
Tr=48/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en rojo(h).
Ta=2/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en amarillo(h).
Tv=40/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en verde(h).
L=0.175; % Longitud del subtramo(km).
B0= 57.12 % Intercepto de la ecuación que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
B1= -0.4308 % Pendiente de la ecuación que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
vmax=B0; % Velocidad máxima(km/h).
pmax=-B0/B1; % Densidad de tráfico máxima(veh/km).
else Subtramo=='BA'
Tr=60/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en rojo(h).
Ta=3/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en amarillo(h).
Tv=37/3600; % Intervalo de tiempo semáforo en verde(h).
L=0.140; % Longitud del subtramo(km).
B0= 48.82 % Intercepto de la ecuación que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
B1= -0.3089 % Pendiente de la ecuación que define la
velocidad en función de la densidad de tráfico.
vmax=B0; % Velocidad máxima(km/h).
pmax=-B0/B1; % Densidad de tráfico máxima(veh/km).
end

N=T/(Tv+Ta+Tr); % Número de eventos en una hora.
n=10; % Número de subintervalos de espacio.
m=20; % Número de subintervalos de tiempo.
vmin=18; % Velocidad mínima(km/h).
pmin=10; % Densidad mínima (veh/km).
for h=1:N % Simulación de los N eventos.
vir(h)=randsrc(1,1,[vmin:vmax]); % Velocidad inicial
randómica en el rango establecido (km/h).
kir(h)=randsrc(1,1,[pmin:pmax]); % Densidad inicial
randómica en el rango establecido (veh/km).
for i=1:n
k=kir(h);
vi=vir(h);
ki=k;
for j=1:m
p(i,j)=k;

```

## CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD- VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR

```

% Ecuación que define la velocidad en función de la densidad
de tráfico.
v(i,j)= B0+B1*p(i,j);
% Solución Ecuación Diferencial Parcial LWR.
k=p(i,j)-((Tv*(n-1))/(L*(m-1)))*(p(i,j)*(v(i,j)-
vi)+v(i,j)*(p(i,j)-ki));
vi=v(i,j);
ki=p(i,j);
end
end

pprom(h)= mean(p(1,:)); % Densidades de tráfico medias
(Veh/km).
vprom(h)= mean(v(1,:)); % Velocidades medias (km/h).
q=p.*v; % Cálculo del flujo de tráfico (Veh/h).
qmax=-(B0^2)/(4*B1); % Cálculo del máximo flujo de tráfico
(Veh/h).
qprom(h)= mean(q(1,:)); % Flujos de tráfico medios
(Veh/h).
vehiculos(h)=qprom(h)*Tv; % Conteo de los vehículos que
pasan por el subtramo en el intervalo de tiempo dt.
vehT(h)=sum(vehiculos); % Total de vehículos que pasan en
el tiempo T.
Tacum(h)=(Tv+Ta+Tr)*h; % Tiempo acumulado.

% Gráficos
figure(1) % Densidad de tráfico vs Velocidad.
plot(p(1,:),v(1:,:), 'b-o',
'MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','w','LineWidth',1.25)
grid on
title('Densidad de tráfico vs
Velocidad.','FontSize',12)
xlabel('Densidad de tráfico p (veh/km)', 'FontSize',12)
ylabel('Velocidad v (km/h)', 'FontSize',12)
hold on
plot([pmin pmax],[vmax
0], 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',5, 'MarkerFaceColor
','g')
str1='vmax';
str2='pmax';
text(0.25,vmax+2,str1,'Color','r','FontSize',10);
text(pmax-2,2,str2,'Color','r','FontSize',10);
hold off

figure(2) % Densidad de tráfico vs Flujo de tráfico.
plot(p(1,:),q(1:,:), 'bo',
'MarkerSize',4,'MarkerFaceColor','w','LineWidth',1.25)
grid on
title('Densidad de tráfico vs Flujo de tráfico.','
FontSize',12)

```



**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD-  
VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR**

```

xlabel('Densidad de tráfico p (veh/km)', 'FontSize',12)
ylabel('Flujo de tráfico q (Veh/h)', 'FontSize',12)
hold on
plot([pmin -B0/(2*B1) pmax],[0 qmax
0], 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',5, 'MarkerFaceColor', 'g')
str3='pmin';
str4='pmax';
str5='qmax';
text(pmin+0.75,50,str3, 'Color', 'r', 'FontSize',10);
text(pmax-5,50,str4, 'Color', 'r', 'FontSize',10);
text(-B0/(2*B1)+1,qmax+50,str5, 'Color', 'r', 'FontSize',10);
hold off

figure(3) % Flujo de tráfico vs Velocidad.
plot(q(1,:),v(1:,:), 'bo',
'MarkerSize',4, 'MarkerFaceColor', 'w', 'LineWidth',1.25)
title('Flujo de tráfico vs Velocidad.', 'FontSize',12)
xlabel('Flujo de tráfico q (Veh/h)', 'FontSize',12)
ylabel('Velocidad v(km/h)', 'FontSize',12)
hold on
plot([0 qmax 0],[0 B0/2
vmax], 'ro', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',5, 'MarkerFaceColor', 'g')
grid on
str6='vmax';
str7='qmax';
text(0+1,vmax+2,str6, 'Color', 'r', 'FontSize',10);
text(qmax+2,B0/2+2,str7, 'Color', 'r', 'FontSize',10);
hold off

figure(4) % Vehículos acumulados en el tiempo.
plot(Tacum*60,vehT, 'b-o',
'MarkerSize',3, 'MarkerFaceColor', 'r', 'LineWidth',1)
grid on
title('Vehículos acumulados en el Tiempo.',
'FontSize',12)
xlabel('Tiempo transcurrido t (min)', 'FontSize',12)
ylabel('Número de vehículos', 'FontSize',12)

figure(5) % Densidad de tráfico vs tiempo.
plot(Tacum*60,pprom, 'b-o',
'MarkerSize',3, 'MarkerFaceColor', 'g', 'LineWidth',1)
grid on
title('Densidad de tráfico media en el Tiempo.',
'FontSize',12)
xlabel('Tiempo transcurrido t (min)', 'FontSize',12)
ylabel('Densidad de tráfico p (veh/km)', 'FontSize',12)

```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD-  
VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR**

```
figure(6) % Densidad de tráfico vs tiempo.
plot(Tacum*60,vprom,'b-o',
'MarkerSize',3,'MarkerFaceColor','w','LineWidth',1)
grid on
title('Velocidad media en el Tiempo.', 'FontSize',12)
xlabel('Tiempo transcurrido t (min)', 'FontSize',12)
ylabel('Velocidad v(km/h)', 'FontSize',12)

figure(7) % Flujo de tráfico vs tiempo.
plot(Tacum*60,qprom,'b-o',
'MarkerSize',3,'MarkerFaceColor','k','LineWidth',1)
grid on
title('Flujo de tráfico medio en el Tiempo.',
'FontSize',12)
xlabel('Tiempo transcurrido t (min)', 'FontSize',12)
ylabel('Flujo de tráfico q (Veh/h)', 'FontSize',12)

end

fprintf('El número de vehiculos que pasan por el
subtramo en una hora es %.0f.\n',vehT(h))

% Ecuación de la recta Velocidad vs Densidad de
tráfico:
[r_p,m_p,b_p] = regression(p(1,:),v(1:,:),'one');
fprintf('La pendiente de la ecuación de la velocidad
en el subtramo %s es %.5f.\n',Subtramo,m_p)
fprintf('El intercepto de la ecuación de la velocidad
en el subtramo %s es %.5f.\n',Subtramo,b_p)
fprintf('La ecuación de la velocidad a partir de la
densidad vehicular \n del subtramo %s es v = %.2f
+%.4f p) \n',Subtramo,b_p,m_p)
fprintf('La ecuación del flujo de tráfico a partir de
la densidad vehicular \n del subtramo %s es q = %.2f p
+%.4f p^2) \n',Subtramo,b_p,m_p)

% Guardar el registro de flujo de tráfico total.
if Subtramo=='AB'
    q5=round(vehT(h));
    save('q5.mat','q5')
elseif Subtramo=='BC'
    q13=round(vehT(h))
    save('q13.mat','q13')
elseif Subtramo=='CB'
    q14=round(vehT(h))
    save('q14.mat','q14')
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DENSIDAD-  
VELOCIDAD Y FLUJO CON EL MODELO LWR**

```
elseif Subtramo=='BA'  
    q6=round(vehT(h))  
    save('q6.mat','q6')  
else disp('Subtramo incorrecto')  
end
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE  
TRÁFICO EN EL SISTEMA**

```
clc; % Borrar pantalla  
clear all; % Borrar todas las variables de la RAM  
close all; % Cerrar todas las ventanas de MATLAB  
warning off all; % Desactivar todos los mensajes de  
advertencia de MATLAB  
%% Flujo de Vehículos  
% Flujos observados en 330 minutos:  
q1_obs=4626;  
q2_obs=3580;  
q3_obs=982;  
q4_obs=564;  
q7_obs=732;  
q8_obs=3944;  
q9_obs=53;  
q10_obs=87;  
q11_obs=80;  
q12_obs=385;  
q15_obs=2701;  
q16_obs=568;  
q17_obs=1244;  
q18_obs=1052;  
q19_obs=845;  
q20_obs=1276;  
q21_obs=4073;  
q22_obs=3283;  
%% Flujo de ingreso a una intersección = Flujo de  
salida de la intersección:  
% Entrada = Salida  
%  $q1 + q3 + q10 + q11 + q16 + q17 + q19 + q22 = q21 + q18 +$   
 $q20 + q2 + q7 + q4 + q9 + q12$   
Entrada_obs=q1_obs+q3_obs+q10_obs+q11_obs+q16_obs+q17_o  
bs+q19_obs+q22_obs  
Salida_obs=q21_obs+q18_obs+q20_obs+q2_obs+q7_obs+q4_obs  
+q9_obs+q12_obs  
E_S=Entrada_obs-Salida_obs
```

## CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRÁFICO EN EL SISTEMA

```
% Ingreso a Paseo Shopping:
q5_obs=q7_obs+q8_obs;

% Acceso lateral a Av. Manuelita Sáenz desde la av.
Antonio Clavijo:
q14_obs=q15_obs+q16_obs;

%% Probabilidades:
% Entrada observada
pq1=q1_obs/Entrada_obs;
pq3=q3_obs/Entrada_obs;
pq10=q10_obs/Entrada_obs;
pq11=q11_obs/Entrada_obs;
pq16=q16_obs/Entrada_obs;
pq17=q17_obs/Entrada_obs;
pq19=q19_obs/Entrada_obs;
pq22=q22_obs/Entrada_obs;

fprintf('La probabilidad de q1 es %.5f.\n',pq1)
fprintf('La probabilidad de q3 es %.5f.\n',pq3)
fprintf('La probabilidad de q10 es %.5f.\n',pq10)
fprintf('La probabilidad de q11 es %.5f.\n',pq11)
fprintf('La probabilidad de q16 es %.5f.\n',pq16)
fprintf('La probabilidad de q17 es %.5f.\n',pq17)
fprintf('La probabilidad de q19 es %.5f.\n',pq19)
fprintf('La probabilidad de q22 es %.5f.\n',pq22)

% Probabilidad de los flujos de salida observados:
pq2=q2_obs/Salida_obs;
pq4=q4_obs/Salida_obs;
pq7=q7_obs/Salida_obs;
pq9=q9_obs/Salida_obs;
pq12=q12_obs/Salida_obs;
pq18=q18_obs/Salida_obs;
pq20=q20_obs/Salida_obs;
pq21=q21_obs/Salida_obs;

fprintf('La probabilidad de q2 es %.5f.\n',pq2)
fprintf('La probabilidad de q4 es %.5f.\n',pq4)
fprintf('La probabilidad de q7 es %.5f.\n',pq7)
fprintf('La probabilidad de q9 es %.5f.\n',pq9)
fprintf('La probabilidad de q12 es %.5f.\n',pq12)
fprintf('La probabilidad de q18 es %.5f.\n',pq18)
fprintf('La probabilidad de q20 es %.5f.\n',pq20)
fprintf('La probabilidad de q21 es %.5f.\n',pq21)

% Ingreso a Paseo Shopping:
pq7_2=q7_obs/q5_obs;
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRÁFICO EN EL SISTEMA**

```

pq8_2=q8_obs/q5_obs;
pq8=(pq7*pq8_2)/pq7_2;
pq5_2=1;

% Acceso lateral a Av. Manuelita Sáenz desde la av.
Antonio Clavijo:
pq15_2=q15_obs/q14_obs;
pq16_2=q16_obs/q14_obs;
pq15=(pq16*pq15_2)/pq16_2;
pq14_2=1;

%=====
% DATOS A SER CALCULADOS
% Flujo de vehículos que ingresarán al sistema:
fprintf('\nINGRESE LOS SIGUIENTES DATOS:.\n')
Dia=input('Ingrese el día:', 's');
if
(Dia=='L') | (Dia=='M') | (Dia=='M') | (Dia=='J') | (Dia=='V')
    Hora=input('Ingrese la hora:', 's')
    if Hora=='08:30'
        q1=randsrc(1,1,[630:936]);
        q3=randsrc(1,1,[30:75]);
        q10=randsrc(1,1,[12:19]);
        q11=randsrc(1,1,[0:25]);
        q16=randsrc(1,1,[72:122]);
        q17=randsrc(1,1,[162:244]);
        q19=randsrc(1,1,[103:153]);
        q22=randsrc(1,1,[522:702]);
    elseif Hora=='11:00'
        q1=randsrc(1,1,[786:960]);
        q3=randsrc(1,1,[108:205]);
        q10=randsrc(1,1,[0:37]);
        q11=randsrc(1,1,[0:121]);
        q16=randsrc(1,1,[73:112]);
        q17=randsrc(1,1,[175:249]);
        q19=randsrc(1,1,[0:200]);
        q22=randsrc(1,1,[528:762]);
    elseif Hora=='13:30'
        q1=randsrc(1,1,[732:1140]);
        q3=randsrc(1,1,[138:211]);
        q10=randsrc(1,1,[6:19]);
        q11=randsrc(1,1,[0:38]);
        q16=randsrc(1,1,[73:195]);
        q17=randsrc(1,1,[187:284]);
        q19=randsrc(1,1,[18:290]);
        q22=randsrc(1,1,[510:744]);
    elseif Hora=='18:30'
        q1=randsrc(1,1,[857:1278]);
        q3=randsrc(1,1,[222:247]);
        q10=randsrc(1,1,[12:36]);

```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRÁFICO EN EL SISTEMA**

```
q11=randsrc(1,1,[0:25]);
q16=randsrc(1,1,[48:151]);
q17=randsrc(1,1,[211:381]);
q19=randsrc(1,1,[120:219]);
q22=randsrc(1,1,[114:1050]);
elseif Hora=='20:00'
q1=randsrc(1,1,[384:696]);
q3=randsrc(1,1,[132:277]);
q10=randsrc(1,1,[0:42]);
q11=randsrc(1,1,[0:19]);
q16=randsrc(1,1,[36:115]);
q17=randsrc(1,1,[144:254]);
q19=randsrc(1,1,[72:207]);
q22=randsrc(1,1,[198:678]);
else
disp('Ingrese otra hora')
end
elseif (Dia=='S')|(Dia=='D')
Hora=input('Ingrese la hora:', 's')
if Hora=='10:00'
q1=randsrc(1,1,[642:930]);
q3=randsrc(1,1,[30:72]);
q10=randsrc(1,1,[0:6]);
q11=randsrc(1,1,[6:18]);
q16=randsrc(1,1,[66:114]);
q17=randsrc(1,1,[216:218]);
q19=randsrc(1,1,[174:187]);
q22=randsrc(1,1,[438:690]);
elseif Hora=='13:00'
q1=randsrc(1,1,[774:906]);
q3=randsrc(1,1,[108:204]);
q10=randsrc(1,1,[12:18]);
q11=randsrc(1,1,[0:1]);
q16=randsrc(1,1,[84:90]);
q17=randsrc(1,1,[103:266]);
q19=randsrc(1,1,[132:217]);
q22=randsrc(1,1,[552:576]);
elseif Hora=='17:00'
q1=randsrc(1,1,[732:1134]);
q3=randsrc(1,1,[138:210]);
q10=randsrc(1,1,[18:30]);
q11=randsrc(1,1,[12:12]);
q16=randsrc(1,1,[96:126]);
q17=randsrc(1,1,[114:218]);
q19=randsrc(1,1,[210:217]);
q22=randsrc(1,1,[594:630]);
elseif Hora=='20:00'
q1=randsrc(1,1,[384:678]);
q3=randsrc(1,1,[132:277]);
q10=randsrc(1,1,[0:7]);
q11=randsrc(1,1,[6:6]);
q16=randsrc(1,1,[31:92]);
```

## CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRÁFICO EN EL SISTEMA

```
q17=randsrc(1,1,[150:204]);
q19=randsrc(1,1,[109:177]);
q22=randsrc(1,1,[348:630]);
else
    disp('Ingrese otra hora')
end
else
    disp('Ingrese otro día')
end

% Entrada:
Entrada=q1+q3+q10+q11+q16+q17+q19+q22
fprintf('El total de vehículos que ingresan al sistema
es %.1f.\n',Entrada)

% Salidas de vehículos predichas:
q2=pq2*Entrada;
q4=pq4*Entrada;
q7=pq7*Entrada;
q9=pq9*Entrada;
q12=pq12*Entrada;
q18=pq18*Entrada;
q20=pq20*Entrada;
q21=pq21*Entrada;

fprintf('\nFLUJOS DE SALIDA ESTIMADOS:\n')
fprintf('El flujo q2 de vehículos que saldrán desde la
intersección A,\n por la av. Manuelita Sáenz sentido Sur-
Norte se estima en: %.0f.\n',q2)
fprintf('El flujo q4 de vehículos que saldrán desde la
intersección A,\n por la calle Pío de Baroja se estima en:
%.0f.\n',q4)
fprintf('El flujo q7 estimado de vehículos que ingresarán al
Paseo Shopping será: %.0f.\n',q7)
fprintf('El flujo q9 de vehículos que saldrán desde la
intersección B,\n por la calle Miguel Delibes sentido Este-
Oeste se estima en: %.0f.\n',q9)
fprintf('El flujo q12 de vehículos que saldrán desde la
intersección B,\n por la calle Miguel Delibes sentido Oeste-
Este se estima en: %.0f.\n',q12)
fprintf('El flujo q18 de vehículos que saldrán desde la
intersección C,\n por la av. Antonio Clavijo sentido Este-
Oeste se estima en: %.0f.\n',q18)
fprintf('El flujo q20 de vehículos que saldrán desde la
intersección C,\n por la av. Antonio Clavijo sentido Oeste-
Este se estima en: %.0f.\n',q20)
fprintf('El flujo q21 de vehículos que saldrán desde la
intersección C,\n por la av. Manuelita Sáenz sentido Norte-
Sur se estima en %.0f.\n',q21)

% Flujo de vehículos en el interior de los subtramos:
```

**CÓDIGO EN MATLAB DE LA SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE TRÁFICO EN EL SISTEMA**

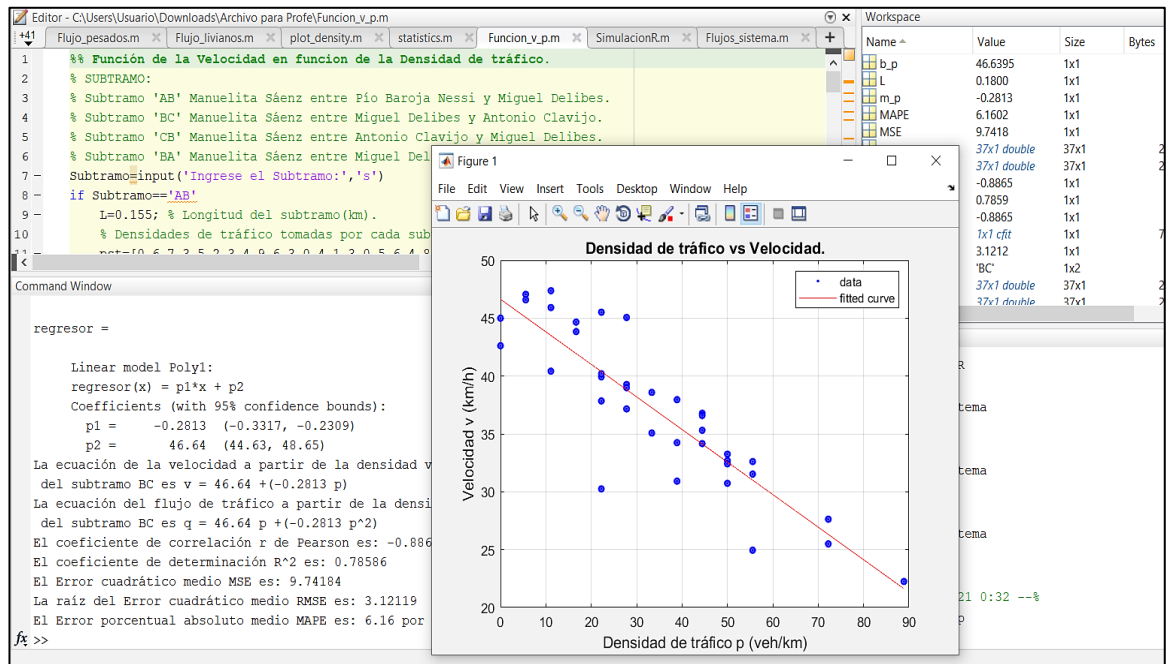
```
% Subtramo A-B
load('q5.mat','q5');
q5=q5
q8=q5-q7;
load('q6.mat','q6');
q6=q6

fprintf('El flujo q5 de vehículos que ingresarán al
subtramo A-B \n desde la intersección A se estima en:
%.0f.\n',q5)
fprintf('El flujo q8 de vehículos que ingresarán a la
intersección B \n desde el subtramo A-B se estima en:
%.0f.\n',q8)
fprintf('El flujo q6 de vehículos que circularán por el
subtramo B-A \n(Sentido Sur-Norte)se estima en:
%.0f.\n',q6)

% Flujo de vehículos en el interior de los subtramos:
% Subtramo B-C
load('q14.mat','q14');
q14=q14
q15=q14-q16;
load('q13.mat','q13');
q13=q13
fprintf('El flujo q14 de vehículos que ingresarán a la
intersección B \n desde el subtramo C-B se estima en:
%.0f.\n',q14)
fprintf('El flujo q13 de vehículos que circularán por
el subtramo B-C \n(Sentido Norte-Sur)se estima en:
%.0f.\n',q13)
fprintf('El flujo q15 de vehículos que ingresarán al
subtramo C-B \n desde la intersección C se estima en:
%.0f.\n',q15)
```



## Anexo D. Ejecución del script de la regresión lineal de la velocidad en función de la densidad de tráfico en MATLAB versión R2018a.



## Anexo E. Ejecución del script de la simulación del tráfico vehicular a través del modelo macroscópico LWR en MATLAB versión R2018a.

The screenshot shows the MATLAB environment with the following components:

- Editor:** Contains a script for the simulation. Key lines include:
 

```

      1 clear all;
      2 warning off all;
      3 clc;
      4 T=1; % Tiempo total de 1 hora (3600 s).
      5 % SUBTRAMO:
      6 % Subtramo 'AB' Manuelita Sáenz entre Pío Baroja Nessi y Miguel Delibes.
      7 % Subtramo 'BC' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Antonio Clavijo.
      8 % Subtramo 'CB' Manuelita Sáenz entre Antonio Clavijo y Miguel Delibes.
      9 % Subtramo 'BA' Manuelita Sáenz entre Miguel Delibes y Pío Baroja Nessi.
      10 Subtramo=input('Ingrese el subtramo: ','s')
      11 if Subtramo=='AB'
      
```
- Workspace:** Lists variables such as B0 (46.6400), B1 (-0.2813), b\_p (46.6400), h (40), i (10), j (20), k (109.3162), ki (109.3162), kir (1x40 double), L (0.1800), m (20), m\_p (-0.2813), n (10), N (40), and n (10x20 double).
- Command Window:** Displays the results of the simulation:
 

```

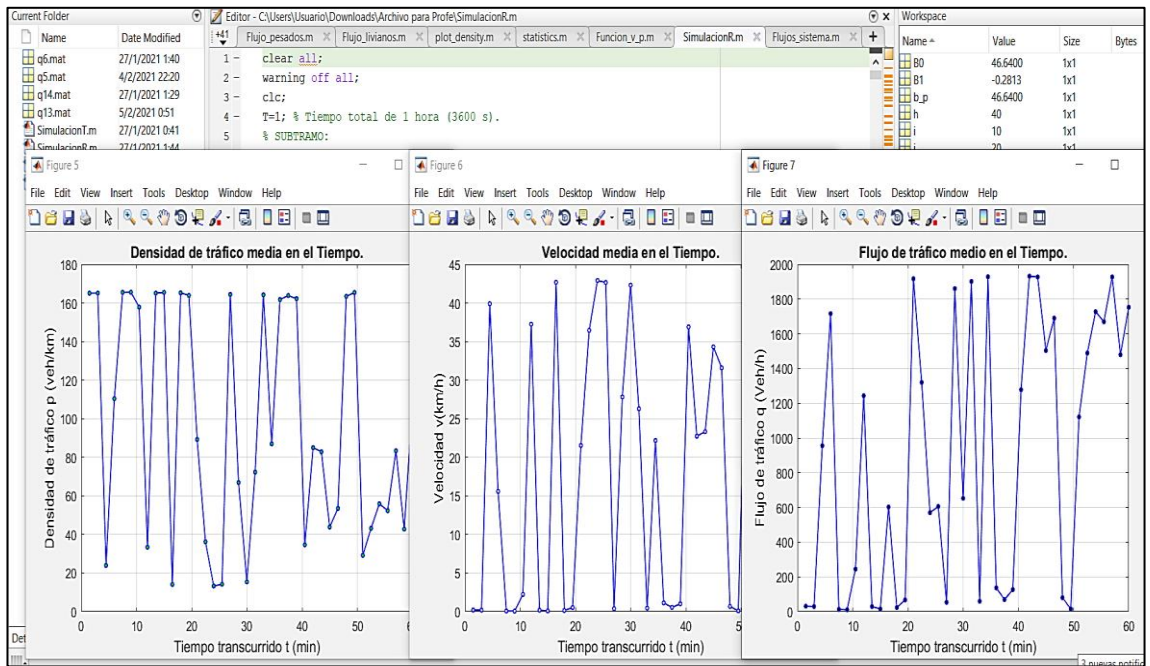
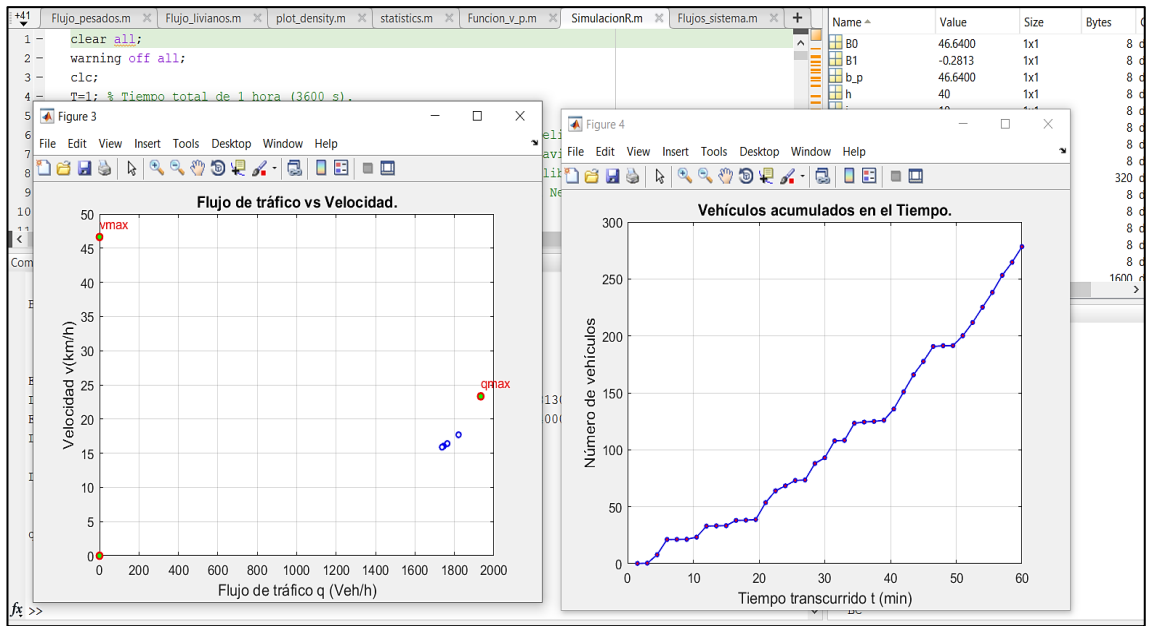
      B1 =
      -0.2813

      El número de vehiculos que pasan por el subtramo en una hora es 278.
      La pendiente de la ecuación de la velocidad en el subtramo BC es -0.28130.
      El intercepto de la ecuación de la velocidad en el subtramo BC es 46.64000.
      La ecuación de la velocidad a partir de la densidad vehicular
      del subtramo BC es v = 46.64 + (-0.2813 p)
      La ecuación del flujo de tráfico a partir de la densidad vehicular
      del subtramo BC es q = 46.64 p + (-0.2813 p^2)

      q13 =
      278
      
```

The screenshot shows the MATLAB environment with two plots displayed:

- Figure 1: Densidad de tráfico vs Velocidad.** A plot of Velocity  $v$  (km/h) versus Density  $p$  (veh/km). The y-axis ranges from 0 to 50, and the x-axis ranges from 0 to 180. A blue line with circular markers shows a linear decrease in velocity as density increases. Key points are labeled:  $v_{max}$  at approximately (10, 47) and  $p_{max}$  at approximately (170, 0).
- Figure 2: Densidad de tráfico vs Flujo de tráfico.** A plot of Flow  $q$  (Veh/h) versus Density  $p$  (veh/km). The y-axis ranges from 0 to 2000, and the x-axis ranges from 0 to 180. A blue line with circular markers shows a parabolic relationship, peaking at  $q_{max}$  (approximately 1800 Veh/h at  $p \approx 100$  veh/km). Other points are labeled:  $p_{min}$  at approximately (10, 0) and  $p_{gmax}$  at approximately (170, 0).



**Anexo F.** Ejecución del script de la simulación del flujo vehicular con base en la probabilidad de ocurrencia de las entradas y salidas del sistema en MATLAB versión R2018a.

The screenshot shows the MATLAB environment with the following components:

- Editor:** Contains a script with the following code:
 

```

94 - Hora=input('Ingrese la hora:', 's')
95 - if Hora=='08:30'
96 -     q1=randsrc(1,1,[630:936]);
97 -     q3=randsrc(1,1,[30:75]);
98 -     q10=randsrc(1,1,[12:19]);
99 -     q11=randsrc(1,1,[0:25]);
100 -    q16=randsrc(1,1,[72:122]);
101 -    q17=randsrc(1,1,[162:244]);
102 -    q19=randsrc(1,1,[103:153]);
103 -    q22=randsrc(1,1,[522:702]);
104 - elseif Hora=='11:00'
      
```
- Workspace:** A table listing variables and their sizes:
 

Name	Value	Size
Dia	'S'	1x1
E_S	0	1x1
Entrada	2213	1x1
Entrada_obs	11715	1x1
Hora	'17:00'	1x5
pq1	0.3949	1x1
pq10	0.0074	1x1
pq11	0.0068	1x1
pq12	0.0329	1x1
pq14_2	1	1x1
pq15	0.2306	1x1
pq15_2	0.8262	1x1
pq16	0.0485	1x1
pq16_2	0.1738	1x1
nn17	0.1062	1x1
- Command Window:** Displays the output of the simulation:
 

```

FLUJOS DE SALIDA ESTIMADOS:
El flujo q2 de vehiculos que saldrán desde la intersección A,
por la av. Manuelita Sáenz sentido Sur-Norte se estima en: 676.
El flujo q4 de vehiculos que saldrán desde la intersección A,
por la calle Pio de Baroja se estima en: 107.
El flujo q7 estimado de vehiculos que ingresarán al Paseo Shopping será: 138.
El flujo q9 de vehiculos que saldrán desde la intersección B,
por la calle Miguel Delibes sentido Este-Oeste se estima en: 10.
El flujo q12 de vehiculos que saldrán desde la intersección B,
por la calle Miguel Delibes sentido Oeste-Este se estima en: 73.
El flujo q18 de vehiculos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Antonio Clavijo sentido Este-Oeste se estima en: 199.
El flujo q20 de vehiculos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Antonio Clavijo sentido Oeste-Este se estima en: 241.
El flujo q21 de vehiculos que saldrán desde la intersección C,
por la av. Manuelita Sáenz sentido Norte-Sur se estima en 769.
      
```
- Command History:** Shows the sequence of commands executed:
 

```

10:00
%-- 5/2/2021 0:32 --%
Funcion_v_p
BC
clear all
clear off all
clc
SimulacionR
BC
clear
clc
Flujos_sistema
s
17:00
      
```