UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"EVALUACIÓN DE LA CINEMÁTICA Y LAS EMISIONES DE LOS VEHÍCULOS EN UNA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA"

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Thom Saúl Sarzosa Guamán

DIRECTOR:

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD.

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sarzosa Guamán Thom Saúl

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Evaluación de la cinemática y las emisiones de los vehículos en una intersección semaforizada
AUTOR (ES):	Sarzosa Guamán Thom Saúl
FECHA: DD/MM/AAAA	27/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **GRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD. Ing. Fausto Eduardo Tapia Gudiño MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
THOM SAUL SARZOSA GUAMAN

(Firma)……
Nombre: Sarzosa Guamán Thom Saúl

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 27 de julio de 2026

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FREDY ALEXANDER ROSERO OBANDO

(f) ……

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD

C.C.: 1002641742

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Evaluación de la cinemática y las emisiones de los vehículos en una intersección semaforizada” elaborado por Thom Saúl Sarzosa Guamán, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



(f):…….

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD.

C.C.: 1002641742



(f):…….

Ing. Fausto Eduardo Tapia Gudiño MSc.

C.C.: 1002251351

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios que sin las fuerzas y fortaleza que el me brindo nunca habría sido posible el poder llegar hasta donde me encuentro el día de hoy.

A Saúl, porque a pesar de las adversidades que la vida le presento nunca se dio por vencido, a pesar de saber que no iba hacer un camino fácil, jamás se rindió por más cuesta arriba que parezca llegar a la meta.

A mi Madre, Silvia Guamán, que en toda mi vida me ayudo con sus consejos, con su guía para cada día ser una mejor persona, por su amor incondicional y por siempre mostrarme que por difícil que parezca la vida siempre existe una luz al final del túnel, por su ejemplo de superación, enseñándome que con esfuerzo y dedicación se puede llegar muy lejos.

A mi Padre, Jaime Sarzosa y a mi hermana Anai que siempre me ayudaron con sus palabras de ánimo y apoyo, que aportaban en mi fuerza, paciencia y amor.

Dedico este trabajo a la persona más especial que llego a mi vida, mi sobrino Teo Benjamín, que llego a ser mi motor para no rendirme y para poder demostrarle que, por él, saldría adelante para poder mostrarle la mejor versión de mí.

A mi compañera universitaria, mi compañera de vida, Jessica, que nunca me dejo solo y siempre estuvo a mi lado para motivarme y siempre decirme que era capaz de lograr grandes cosas.

Thom Saúl Sarzosa Guamán

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer de manera muy especial a todas las personas que fueron parte de este proceso, por siempre bríndame sus palabras de ánimo y cariño para poder alcanzar la meta propuesta. A mis padres y familia por sus ejemplos de superación y apoyarme en mis metas, objetivos y vida.

A mi amigo, compañero de clase y hermano Wilman Sánchez por siempre brindarme sus palabras de ánimo y cariño, demostrándome que en la vida si se puede encontrar una amistad verdadera.

Al resto de mis amigos (Anderson, Mateo, Paul, Byron, Dayana) por brindarme su amistad y compartir conmigo sus enseñanzas y hacer más llevadera mi carrera universitaria.

A mi tutor de tesis, Ing. Fredy Rosero, por haber confiado en mí, por brindarme sus conocimientos, por sus jaladas de oreja que cada día me ayudaron a poder salir adelante y poder entregar un trabajo digno de mi persona.

Un agradecimiento especial al Ing. Carlos Mafla, por siempre brindarme su apoyo y sus conocimientos, porque más que un docente siempre fue un amigo y colega dentro y fuera de las aulas.

Agradezco a todas las personas que forman parte de la carrera de Ingeniera Automotriz, porque siempre estuvieron pendiente de mí y siempre tuvieron los mejores deseos para conmigo.

Finalmente agradecer de manera especial a Jessica, que sigue siendo mi compañera durante todos estos años, brindándome su apoyo, cariño y paciencia a lo largo del desarrollo de esta investigación, motivándome a no darme por vencido. Además de ser un ejemplo de superación y una inspiración para mí.

Thom Saúl Sarzosa Guamán

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda el problema sobre el desempeño operacional y ambiental de los vehículos en una intersección semaforizada de la ciudad de Ibarra. El objetivo general fue evaluar la cinemática y las emisiones en una intersección semaforizada de Ibarra mediante el uso de un simulador de tráfico y de emisiones, con el fin de mejorar las condiciones de movilidad y reducir el impacto ambiental. La metodología comprendió una campaña experimental para la recolección de datos, el uso de cámaras ANPR para obtener información sobre los volúmenes de tránsito, la composición del parque vehicular y la infraestructura de la intersección. Posteriormente, se determinaron tiempos óptimos del ciclo semafórico mediante el método de Webster y un software de simulación PTV VISSIM para analizar indicadores cinemáticos y ambientales. Los resultados evidenciaron que el parque vehicular está conformado principalmente por vehículos tipo sedan con una participación aproximada del 50%. Asimismo, se logró evidenciar que actualmente el ciclo semafórico no es óptimo para dicha intersección ya que modifica el comportamiento cinemático de los vehículos, reflejándose en variaciones de la velocidad promedio, la aceleración positiva entre otras variables. De las alternativas analizadas, la Propuesta 2, correspondiente a un ciclo semafórico de 45s, presento el mejor desempeño global al mejorar la movilidad vehicular y favorecer condiciones de operación contribuyendo a reducir el impacto ambiental en la intersección.

Palabras clave: Intersección semaforizada, cinemática vehicular, emisiones vehiculares, optimación semafórica.

ABSTRACT

This research addresses the problem of the operational and environmental performance of vehicles at a signalized intersection in the city of Ibarra. The overall objective was to evaluate the kinematics and emissions at this intersection using a traffic and emissions simulator, with the aim of improving mobility conditions and reducing environmental impact. The methodology included an experimental campaign for data collection, the use of ANPR cameras to obtain information on traffic volumes, vehicle fleet composition, and intersection infrastructure. Subsequently, optimal traffic signal cycle times were determined using Webster's method and the PTV VISSIM simulation software to analyze kinematic and environmental indicators. The results showed that the vehicle fleet is primarily composed of sedans, representing approximately 50% of the total. Furthermore, it was found that the current traffic signal cycle is not optimal for this intersection, as it alters the kinematic behavior of the vehicles, resulting in variations in average speed, positive acceleration, and other variables. Of the alternatives analyzed, Scenario 2, corresponding to a 45-second traffic light cycle, presents the best overall performance by improving vehicular mobility and favoring operating conditions, thus contributing to reducing the environmental impact at the intersection.

Keywords: Signalized intersection, vehicle kinematics, vehicle emissions, traffic light optimization

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I 18
INTRODUCCIÓN 18
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 18
1.1.1 Antecedentes 18
1.1.2 Planteamiento del Problema 19
1.2 JUSTIFICACIÓN 21
1.3 OBJETIVOS 22
1.3.1 Objetivo General 22
1.3.2 Objetivo Específicos 22
1.4 ALCANCE 23
CAPÍTULO II 24
MARCO TEÓRICO 24
2.1 FUNDAMENTOS DE EMISIONES VEHICULARES 24
2.1.1 Tipos de emisiones de vehículos 24
2.1.2 Descripción de contaminantes generados por un vehículo 25
2.1.2.1 Dióxido de carbono (CO2) 25
2.1.2.2 Monóxido de Carbono (CO) 26
2.1.2.3 Hidrocarburos (HC) 26
2.1.2.4 Óxidos de Nitrógeno (NOx) 26
2.2. FORMACIÓN DE EMISIONES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN 27
2.2.1 Normas de emisiones para el transporte vehicular 28
2.2.2 Cinemática del Vehículo 30
2.3 FUNDAMENTOS DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS 31
2.3.1 Congestión vehicular 32
2.3.2 Parámetros fundamentales de tráfico 33
2.3.2.1 Intensidad 34

2.3.2.2 Velocidad 35
2.3.2.3 Densidad 35
2.3.3 Ecuación fundamental del tráfico 36
2.4 TEORÍA DE COLAS 38
2.4.1 Fuentes de entrada o llegadas 38
2.4.2 Cola 39
2.4.3 Mecanismos de servicio 39
2.4.4 Ciclos de trabajo de una intersección semaforizada 39
2.5 FUNDAMENTO DE MODELAMIENTO DE EMISIONES 40
2.5.1 Enfoques para modelar emisiones vehiculares. 40
2.5.2 Modelamiento de Tráfico Vehicular 41
2.5.3 Modelamiento de Emisiones Vehiculares 41
2.5.4 Combinaciones Posibles para el modelamiento 42
CAPÍTULO III 43
MATERIALES Y MÉTODOS 43
3.1 SELECCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO 43
3.1.1 Variables Cinemáticas 44
3.1.2 Modos de operación 44
3.1.3 Variables de tráfico 45
3.2 SELECCIÓN DE LA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA 45
3.2.1. Área de estudio seleccionada 46
3.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SOFTWARE 47
3.3.1 Cámaras 47
3.3.1.1 Cámara Hikvision iDS-TCD403-BI 47
3.3.1.2 Cámara Dahua Access ANPR 48
3.3.2. Medidor de concentración de emisiones 49
3.3.2.1 AirGradient Open Air 50

3.3.3 Programas para el Modelación de Tráfico y Emisiones 50
3.3.3.1 Software SUMO 51
3.3.3.2 Software Vissim 51
3.3.3.3 Software de Emisiones 52
3.3.3.4 Simulador MOVES 52
3.3.3.5 Simulador COPERT 53
3.4 PRUEBAS INICIALES Y CONFIGURACIÓN DE EQUIPO 55
3.4.1 Cámaras 55
3.4.1.1 Instalación de Cámaras 55
3.4.1.2 Funcionamiento 56
3.4.1.3 Verificación de Conteo y Tipo 58
3.4.1.4 Configuración de Cámara 59
3.4.1.5 Configuración de ConfigTool 59
3.4.2 Medidor de Concentración de Emisiones 60
3.4.2.1 Instalación 60
3.4.2.2 Funcionamiento 61
3.4.2.3 Verificación 61
3.4.2.4 Configuración de AirGradient Open Air 62
3.4.3. Modelo de Tráfico: Cinemático y Emisiones 63
3.4.3.1 Instalación 63
3.4.3.2 Funcionamiento 63
3.4.3.3 Verificación 65
3.5 RECOLECCIÓN DE DATOS Y CAMPAÑA EXPERIMENTAL 66
3.5.1 Clasificación vehicular 69
3.6 MODELAMIENTO Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES 69
3.6.1 Creación de la intersección 70
3.6.2 Incorporación Flota Vehicular y otros elementos 72

3.6.3 Configuración de Señales Tráfico 74
3.6.3.1 Intervalo de cambio de fase 75
3.6.3.2 Flujo de saturación y tiempo perdido 76
3.6.3.3 Ciclo optimo de semaforización 79
3.6.4 Simulación Cinemática Vehicular y Emisiones 80
3.6.5 Extracción de Datos 82
CAPITULO IV 84
RESULTADOS Y ANÁLISIS 84
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA INTERSECCIÓN 84
4.1.1 Composición Vehicular 84
4.1.2 Giros y Direcciones 90
4.1.2.1 Lunes 90
4.1.2.2. Jueves 91
4.1.2.3 Sábado 92
4.1.3 Configuración del Semáforo 92
4.2 ANÁLISIS CINEMÁTICOS POR ESCENARIO 93
4.2.1 Velocidad promedio 94
4.2.2 Aceleración positiva promedio 95
4.2.3 Desaceleración promedio 96
4.2.4 Número de paradas 97
4.2.5 Tiempos de modos de operación 98
4.3 ANÁLISIS DE EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR ESCENARIO 100
4.3.1 Emisiones de NOx 100
4.3.2 Consumo de Combustible 101
4.4 COMPARACIÓN GENERAL ESCENARIOS 102
CAPITULO V 104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 104

5.1 Conclusiones 104

5.2 Recomendaciones 106

REFERENCIAS 107

ANEXOS 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de intensidad 34
Tabla 2. Ciclos de funcionamiento de un semáforo 40
Tabla 3. Variables Cinemáticas 44
Tabla 4. Modos de operación del vehículo 44
Tabla 5. Variables de Tráfico 45
Tabla 6. Ventajas y Desventajas de los simuladores de Tráfico y Emisiones 54
Tabla 7. Toma de Datos en la Calle Simón Bolívar 58
Tabla 8. Toma de Datos en la Calle Oviedo 58
Tabla 9. Datos Capturados el 21/04/2025 66
Tabla 10. Datos Capturados el 24/04/2025 67
Tabla 11. Datos Capturados el 26/04/2025 67
Tabla 12. Funcionamiento del semáforo de la intersección 74
Tabla 13. Número de Vehículos con su respectiva calle y horario 90
Tabla 14. Trayectoria Dia Lunes 91
Tabla 15. Trayectoria Dia Jueves 91
Tabla 16. Trayectoria Dia Sábado 92
Tabla 17. Tiempos del ciclo semafórico en la intersección 93
Tabla 18. Comparación de Escenarios 103
Tabla 19. Toma de Datos en la Calle Simón Bolívar 112
Tabla 20. Toma de Datos en la Calle Oviedo 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de emisiones producidas por la combustión en los vehículos. 25
Figura 2. Emisiones contaminantes producidas por el vehículo. 27
Figura 3. Estándares de emisiones para vehículos en varios países. 30
Figura 4. Impacto producido por la velocidad media. 31
Figura 5. Tipos de intersecciones. 32
Figura 6. Intersecciones que se encuentra reguladas por un sistema de luces. 32
Figura 7. Congestión vehicular en la ciudad de Ibarra. 33
Figura 8. Relación entre la velocidad y la densidad. 37
Figura 9. Relación entre la intensidad y la densidad. 37
Figura 10. Esquema de un sistema de colas. 38
Figura 11. Combinaciones para el cálculo de factores de emisión. 42
Figura 12. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación. 43
Figura 13. Intersección ocupada para la campaña experimental. 46
Figura 14. Equipos y Software según su variable. 47
Figura 15. Cámara Hikvision iDS-TCD403-BI. 48
Figura 16. Cámara Dahua Access ANPR. 49
Figura 17. Medidor de Gases AirGradient Open Air. 50
Figura 18. Software Sumo. 51
Figura 19. Software Vissim 52
Figura 20. Simulador MOVES 53
Figura 21. Simulador COPERT 54
Figura 22. Conexiones pertinentes en la instalación de cámaras 56
Figura 23. Cable ocupado para lo conexión de red 56
Figura 24. Configuración de Sistema de las cámaras 57
Figura 25. Proceso de conteo de Vehículos mediante las cámaras 57
Figura 26. Configuración de las cámaras 59
Figura 27. Configuración de ConfigTool 60
Figura 28. Instalación del Medidor de Emisiones 61
Figura 29. Muestras tomadas del Medidor de Emisiones 62
Figura 30.Configuración Air Gradient 62
Figura 31. Descarga de aplicación 63
Figura 32. Proceso de seguimiento para licencia 64

Figura 33. Pasos para activación 64
Figura 34. Selección para activación de cuenta 65
Figura 35. Licencia aprobada y activada para su uso 65
Figura 36. Ejercicio de Simulación en Vissim 66
Figura 37. Clasificación Vehicular de la Calle Simón 69
Figura 38. Identificación del lugar de estudio 70
Figura 39. Trazado de enlaces en el Software 71
Figura 40. Etiquetado de vías y características geométricas en el Software 71
Figura 41. Zona de conflicto entre las dos vías 72
Figura 42. Implementación de Flota Vehicular en el Software 73
Figura 43. Simulación de la Flota Vehicular 73
Figura 44. Configuración del tiempo de los semáforos 74
Figura 45. Simulación del funcionamiento de las señales de tránsito 75
Figura 46. Configuración de Parámetros para a la simulación en el Software 81
Figura 47. Creación de nodos en el Software 81
Figura 48. Obtención de Datos Cinemáticos 82
Figura 49. Obtención de Datos de Emisiones 82
Figura 50. Extracción de datos en diferentes formatos 83
Figura 51. Datos Extraídos en formato CVS 83
Figura 52. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Lunes. 85
Figura 53.Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Lunes 86
Figura 54. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Jueves 87
Figura 55. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Jueves 88
Figura 56. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Sábado 89
Figura 57. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Sábado 89
Figura 58. Velocidad promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm 95
Figura 59. Aceleración positiva máxima por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm... 96
Figura 60. Desaceleración promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. 97
Figura 61. Número de paradas promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. . 98
Figura 62. Distribución porcentual de modos de operación (Jueves 11:00–12:00) 99
Figura 63. Tiempos promedio de operación vehicular en los modos de operación 100
Figura 64. Emisiones de NOx por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. 101
Figura 65. Consumo de Combustible por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. 102

ÍNDICE DE ECUACIÓN

Ecuación 1 27
Ecuación 2 28
Ecuación 3 34
Ecuación 4 35
Ecuación 5 36
Ecuación 6 75
Ecuación 7 76
Ecuación 8 77
Ecuación 9 77
Ecuación 10 78
Ecuación 11 79
Ecuación 12 79

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación

Congestión vehicular en zonas urbanas de la cuidad de Ibarra debido a la operación ineficientes de intersecciones semaforizadas

1.1.1 Antecedentes

El presente proyecto se enfoca en evaluar el efecto de la configuración de los ciclos de semáforo en las emisiones y en la cinemática de los vehículos al aproximarse y alejarse de una intersección. Varios estudios a nivel mundial han abarcado el problema de las emisiones vehiculares en las intersecciones semaforizadas. Tal es el caso de un estudio realizado en la cuidad de Wuhan, China el cual se enfocó en que los semáforos actúen como nodos con el fin de recopilar datos sobre los vehículos incluso cuando estos se encuentren aglomerados y el flujo vehicular sea mayor. Estos datos servirían para evaluar el nivel de emisiones además de evidenciar el comportamiento cinemático que tienen los vehículos al aproximarse y alejarse a una intersección semaforizada (Wu et al., 2021).

En la actualidad existen métodos modernos para analizar este tipo de problémica, como suelen ser simuladores de tráfico, combinados con simuladores de emisiones, de ahí que trabajos como el de Christina Quaassdorff, desarrollo una metodología para la estimación de emisiones en la cuidad de Madrid, esto considerando el comportamiento que tienen los vehículos de manera individual, además de las señales de tráfico. El sistema de simulación aplicado fue el de un simulador de tráfico VISSIM y un modelo de emisiones VERSIT+micro, estos proporcionan estimaciones detalladas de las emisiones en distintas configuraciones de tráfico. Así se obtuvo resultados en la relevancia que tiene las intersecciones en el comportamiento con los vehículos y las emisiones (Quaassdorff et al., 2016).

De igual manera en Estados Unidos, un estudio noto que el consumo de combustible y el nivel de emisiones dependía de factores como: el diseño del vehículo, el estilo de conducción y el diseño de la carretera, sin embargo, las intersecciones es el lugar en donde esta problemática es más notoria. En dicho estudio, se realizó mediante los modelos VT-CPFM y COPERT el análisis de dos configuraciones diferentes en los semáforos como

son: el ciclo normal, y el log normal. Con este tipo de configuración se pudo evidenciar que los conductores se daban cuenta de antemano el color del semáforo evitando el aceleran para cruzar la intersección a tiempo, o el comienzan de desaceleración sea antes, lo que haría que el patrón de frenado sea más optimo (Albool et al., 2023).

Rosero, Mera y León, analizaron los efectos en el consumo de combustible a causa de las intersecciones semaforizadas en autobuses, basado en la toma de datos en la caracterización de la flota vehicular, y en las caracterizaciones de ruta esto con la finalidad de poder realizar el levantamiento de tiempos de espera que se tienen en los semáforo, con los valores identificados se puedo determinar que el consumo de combustible en las intersecciones es del 22% y que el nivel de emisiones también tienen un crecimiento, todo este proceso se lo realizo de manera manual y a través de aplicaciones móviles que permitían obtener valores como: velocidad promedio, velocidad promedio en movimiento, distancia total, velocidad máxima, entre otras (F. A. R. Obando et al., 2017).

En la cuidad de Ibarra se encontró un estudio previo realizado por Realpe y Enríquez, en este estudio se logró cuantificar el nivel de emisiones vehiculares en una intersección semaforizada, este método se basó en el uso de la estequiometria en donde se tomó en consideración factores como una velocidad promedio, el flujo vehicular, el flujo de congestión en los semáforos, la longitud de las colas, entre otros. En base a todas estas variables se logró mejorar los ciclos de trabajo que tienen los semáforos y poder garantizar un menor consumo de combustible, un nivel de emisiones mucho menor y evitar que la cola de los vehículos al llegar a una intersección sea casi nula (Enríquez Aldás David, 2018).

1.1.2 Planteamiento del Problema

Las emisiones que generan los vehículos son una de las principales fuentes de contaminación ambiental urbana, dichas emisiones contienen una variedad de sustancias nocivas como son el dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), entre otras (Y. Li et al., 2017). La Unión Europea ha establecido que el 72% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), provienen de vehículos en carretera, representando un incremento exponencial de casi el 34% en las últimas tres décadas (Parlamento Europeo, 2022). Las emisiones vehiculares en la actualidad son uno de los mayores retos ambientales, puesto que estas emisiones se las encuentra en cuidades con un alto nivel de vehículos, lo que es muy típico en países de América Latina (Smirnov et al., 2022). La mayoría de las

personas ocupan vehículos para su movilidad, generando el 39% de las emisiones totales, tomando en consideración que alrededor del 80% de las personas se encuentran viviendo en cuidades, que aportan a que la degradación de la calidad del aire incremente (Gianluca Merlo, 2023; Mukesh et al., 2022).

La congestión vehicular es una los principales factores que han provocado el incremento de las emisiones en zonas urbanas en las últimas décadas; a nivel mundial, al menos el 30% de hogares poseen un vehículo de dos ruedas, y el 10% posee un automóvil de cuatro ruedas o un vehículo utilitario (Gordon et al., 2018). La causa fundamental de la congestión es la fricción que existe entre los vehículos en un flujo de tránsito (Thomson, 2001), esto ha sido evidenciado por usuarios frecuentes al observar que sus tiempos de viaje son más prolongados y que la velocidad promedio en sus viajes a aumentado; el aumento de la población a nivel mundial ha generado un incremento en la cantidad de vehículos lo que ha producido una mayor congestión en zonas urbanas. La reducción en la congestión vehicular se encuentra vinculado con los valores de emisiones producidas, con la identificación de las áreas de congestión y con la planificación de rutas (Shang et al., 2024).

En las cuidades, las intersecciones son uno de los principales puntos de generación de congestión vehicular. Una intersección es considera un área en donde se encuentran una o más vías, cuya función es el poder controlar la seguridad y la velocidad de circulación (Sergio Navarro, 2008). Sin embargo, las intersecciones causan un impacto en el consumo de combustible y las emisiones(Albool et al., 2023). Existen diferentes tipos de intersecciones como son rotondas, pasos a desnivel, semáforos, entre otros; siendo las intersecciones semaforizadas las de mayor impacto perjudicial esto por la configuración en los ciclos de verde o rojo, los cuales se encuentran vinculados con el tiempo de viaje adicional, el consumo de combustible y el alto nivel de emisiones como consecuencia del proceso de arranque y parada que tienen los vehículos (Lin et al., 2022).

En Ecuador, la población en cada una de las cuidades ha experimentado un crecimiento constaste (INEC, 2023), como resultado el crecimiento de las poblaciones urbanas ha significado un incremento de emisiones en varias zonas del país (Comisión Europea, 2023). En cuidades como Ibarra la estructura de sus calles es de forma cuadriculada por lo que la mayoría de sus intersecciones se encuentran controladas por semáforos; debido al crecimiento de la población en un 40%, los escenarios de congestión en la cuidad de Ibarra son más evidentes, según la empresa de Movilidad del Norte el poder circular en horas pico resulta casi imposible esto ya que la mayoría de los problemas de tránsito se

encuentran en las intersecciones (José Roberto Marcillo del Castillo, 2021). Por lo tanto, las emisiones vehiculares generadas en las intersecciones semaforizadas y como estas pueden variar de acuerdo con la configuración de los semáforos, se convertiría en una problemática que debe ser abordada.

1.2 Justificación

La presente investigación tiene el propósito de analizar los factores cinemáticos y de emisiones en una intersección semaforizada de la cuidad de Ibarra. Algunas investigaciones anteriores han buscado optimizar el flujo de tráfico vehicular en la intersección, esto debido a que la congestión vehicular ha llegado a representar un problema tanto en temas económicos, sociales y ambientales. Dentro de lo económico los tiempos de viaje han incrementado por lo cual los costos en el trasporte aumentan, a nivel social, la calidad de vida de las personas se ve en disminución, y de manera ambiental, se presenta un incremento en las emisiones, todo esto debido a las intersecciones (Bogaerts et al., 2020)

Las emisiones vehiculares se han convertido en uno de los problemas más grandes en la salud de las personas, alrededor de 3 millones de personas mueren con enfermedades respiratorias netamente pulmonares, esto debido a la exposición directa que tienen con la contaminación vehicular. De ahí la importancia de analizar el comportamiento que tienen los vehículos cuando se encuentran expuestos a una intersección, con la finalidad de poder generar nuevas alternativas para evitar un alto índice de contaminación (Organización Mundial de la Salud, 2023)

Una intersección es el punto en donde una gran cantidad de vehículos experimentan situaciones como desaceleración, ralentí y aceleración, muchas de estas intersecciones suelen ser controladas por semáforos los cuales se encuentran instalados con el fin de atender necesidades de tráfico tales como la congestión vehicular, los accidentes de tránsito y la seguridad vial de los peatones (Zhang et al., 2013). Sin embargo, la implementación de estos instrumentos ha traído como resultado que el nivel de emisiones sea mayor, que los tiempos de viaje aumenten y que el consumo de combustible sea más notable, todo esto debido a que los vehículos pasan mucho tiempo en estado de ralentí lo que ocasiona que el vehículo sufra de combustiones incompletas en el motor lo que genera que los gases de escape aumenten (Fernández et al., 2017)

En los últimos años el uso de simuladores de tráfico ha sido de gran ayuda en la ingeniería automotriz esto debido a que el transporte y la movilidad personal han experimento

cambios radicales, siendo considerados tanto el tráfico como el transporte como sistemas complejos a evaluar (Nguyen et al., 2021). Con el uso de estos simuladores podremos obtener una visión realista y detallada de los flujos de tráfico además de una interacción de los distintos vehículos y usuarios en la vía, de esta manera podremos detectar cuales son los puntos más críticos que enfrentan los vehículos al encontrarse en una intersección, con la finalidad de anticipar los efectos que puede producir y lograr garantizar una menor congestión vehicular (Tarapues Cadena, 2019)

De la misma manera en los últimos años, los simuladores de emisiones se han convertido en una herramienta valiosa la cual permite entender cómo afectan los sistemas de control de tráfico el comportamiento que tienen los vehículos al acercarse y alejarse a una intersección semaforizada. Para evaluar correctamente las emisiones producidas por los vehículos, es fundamental tener en cuenta el tiempo que pasan en sus diferentes modos de funcionamiento, como la aceleración, la desaceleración y el ralentí (Zhao & Sadeka, 2013).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la cinemática y emisiones de los vehículos al aproximarse y alejarse a una intersección semaforizada para comprender el efecto de la configuración de los ciclos de la señal de tránsito.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Analizar los fundamentos teóricos de la cinemática y emisiones vehiculares, fundamentos de tráfico, y el uso de modelos de tráfico y emisiones.
- Realizar una campaña experimental para caracterizar la actividad vehicular, la composición de la flota y la configuración de señales y dispositivos de tráfico en una intersección semaforizada de la cuidad de Ibarra.
- Modelar los perfiles cinemáticos y las emisiones de los vehículos en una intersección semaforizada para diferentes escenarios con distintas configuraciones de ciclos de trabajo.
- Comparar la cinemática y las emisiones de los vehículos al aproximarse y alejarse a la intersección para cada escenario propuesto.

1.4 Alcance

La presente investigación se enfocará en evaluar la cinemática y las emisiones de los vehículos en una intersección semaforizada de la cuidad de Ibarra. Para esto, se establecerá cuatro fases de estudio que se describirán a continuación. En primer lugar, se realizará un análisis de la fundamentación teórica relacionado con la cinemática y emisiones de los vehículos, además de fundamentos sobre el tráfico y el uso de modelos de tráfico y emisiones. En segundo lugar, en una intersección de la cuidad de Ibarra, se efectuará una campaña experimental para caracterizar su actividad vehicular, la composición de la flota, la configuración de señales y dispositivos. En tercer lugar, se usará un modelo de tráfico y uno de emisiones para simular perfiles cinemáticos y emisiones vehiculares con diferentes configuraciones de ciclos de trabajo en el semáforo. Y, por último, en la cuarta etapa, se realizará una comparación de los resultados cinemáticos y las emisiones de los vehículos para cada escenario propuesto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de emisiones vehiculares

Los vehículos de combustión interna producen un gran número de gases los cuales se encuentran clasificados en gases de efecto invernadero (GEI) y gases contaminantes del aire. Debido a que el número de vehículos ha aumentado en zonas urbanas, se ha producido una mayor congestión vehicular, lo que ha provocado una afectación directa en el ambiente y en la salud de las personas (Forehead & Huynh, 2018). El transporte por carretera es el causante de alrededor del 51% de gases de óxidos de nitrógeno (NOx), un 89% de gases de monóxido de carbono (CO), además, del 16% de gases de Dióxido de carbono (CO_2) (Y. Li et al., 2017). En consecuencia, varios fabricantes han tratado de conseguir diversas soluciones ya sean tecnológicas o manuales para mantener un control del nivel de emisiones. Sin embargo, varias de estas soluciones interrumpen en el rendimiento y eficiencia que tienen los vehículos en carretera y en condiciones de tráfico real.

2.1.1 Tipos de emisiones de vehículos

Dentro de las emisiones vehiculares podemos encontrar diferentes tipos, las mismas que son clasificadas de acuerdo con el origen por el cual se producen. Una de ellas son las emisiones evaporativas, las cuales son causadas por la evaporación de combustible ya sea con el vehículo en movimiento o en reposo. Otro tipo son las emisiones por desgaste, las cuales son producidas por el fraccionamiento en los neumáticos y por el proceso de frenado que mantiene constantemente los vehículos (Boulter, 2009) y por último se tienen las emisiones de escape las cuales son las más comunes ya que son causa de la combustión del motor (Lara, 2009) (Figura 1). Los gases involucrados en este último tipo de emisiones son Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos (HC), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Material Particulado (PM), son considerados los gases más nocivos para la salud de las personas, además de ser producidos en casos de tráfico y congestión vehicular (Y. Li et al., 2017).



Figura 1. Tipos de emisiones producidas por la combustión en los vehículos. (Google, 2025)

2.1.2 Descripción de contaminantes generados por un vehículo

Varios de los gases identificados en las emisiones generadas por el sistema de escape serán detallas a continuación uno a uno con el fin de entender la importancia que cada uno de estos representan para el ambiente y sus respectivos cambios climáticos, además del impacto que causa en la salud de todas las personas.

2.1.2.1 Dióxido de carbono (CO2)

El CO2 es un gas inodoro, incoloro, ácido y no inflamable conocido comúnmente como gas de efecto invernadero (GEI), debido al aumento de temperatura que existe en la superficie de la tierra y al contacto con la energía del Sol. Dicho gas es el principal responsable de aproximadamente las tres cuartas partes de las emisiones en el planeta. Un alto nivel de este gas producido se ve relacionado con el cambio climático y con la mayoría de las enfermedades en los seres humanos (S. Li et al., 2024) ya que puede permanecer en el ambiente miles de años. En los vehículos, dicho gas es provocado debido a la combustión producida por el motor dependiendo de la cantidad de energía necesaria para circulación y eficiencia de este (F. R. Obando et al., 2024). Por lo tanto, se puede definir que esta energía depende netamente del peso del vehículo y la potencia a la que circula.

2.1.2.2 Monóxido de Carbono (CO)

El CO es un gas incoloro e inodoro producido directamente por la combustión incompleta ya sea de aceites, madera, combustible o carbón. Además, es un gas muy nocivo para la salud de las personas, puesto que no necesita encontrarse en cantidades altas para representar un peligro en lo que tiene que ver a enfermedades cardiacas (Khreis et al., 2016). Por otro lado, es un contaminante directo para el ambiente, debido a que sus componentes afectan a la capa de ozono y se encuentran reflejados en el nivel de smog o humo negro el cual es más visible cuando existe la presencia de tráfico (Lara, 2009). Dentro del vehículo, este gas es producido por los arranques del motor y liberados directamente por los tubos de escape (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, 2024). Es por ello por lo que en la actualidad varios fabricantes han incorporado en sus vehículos métodos para reducir los niveles de CO producidos, esto ha sido posible por medio de catalizadores o a su vez de sensores de oxígeno.

2.1.2.3 Hidrocarburos (HC)

Los hidrocarburos son un grupo de compuestos orgánicos los cuales se encuentran formados a base de carbono e hidrógeno, dicho elemento es la causa de una combustión incompleta, esto ya sea por factores como una baja compresión en el motor, una mala ignición o por un encendido pobre, dicho compuesto puede darse tanto en vehículos gasolina como diésel (Nicolás Ortuya, 2023). Factores como el arranque en frío en los vehículos a causado que alrededor de un 80% de los gases expulsados sean hidrocarburos (Han et al., 2024a)Aunque este tipo de gas no es mortal para la salud, un alto consumo de este puede causar daños irreversibles en la piel y el sistema respiratorio (Lara, 2009). Por lo tanto, a fin de poder resolver el problema de emisiones con respecto a los hidrocarburos se han incluido métodos de pretratamiento y postratamiento los cuales se encuentran relacionados con el ajuste en el aire de la admisión, en un tratamiento en el combustible, entre otras alternativas (Han et al., 2024).

2.1.2.4 Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Los NOx es el término genérico utilizado para los óxidos de nitrógeno, este gas es formado debido a la mezcla de dos componentes como son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) (Liu et al., 2023). Este tipo de gas dentro en motores de combustión es el resultado producido por la quema de combustible a alta temperatura en

una atmósfera en donde existe alta cantidad de oxígeno. En la actualidad, los vehículos de inyección a gasolina generan un alto nivel de NOx y material particulado esto debido a las mezclas pobres de combustible combinado con las altas presiones. Varios fabricantes están enfocados en tratar de eliminar gases como el CO2, pero no se dan cuenta del impacto que están causando con los otros gases. Los NO_x no solo son causa de una gran contaminación ambiental, debido a que producen un ácido nítrico el cual nos da como resultado la lluvia ácida, sino que producen efectos irreversibles en la salud de las personas con problemas en la piel o en su sistema pulmonar (Wang et al., 2024).

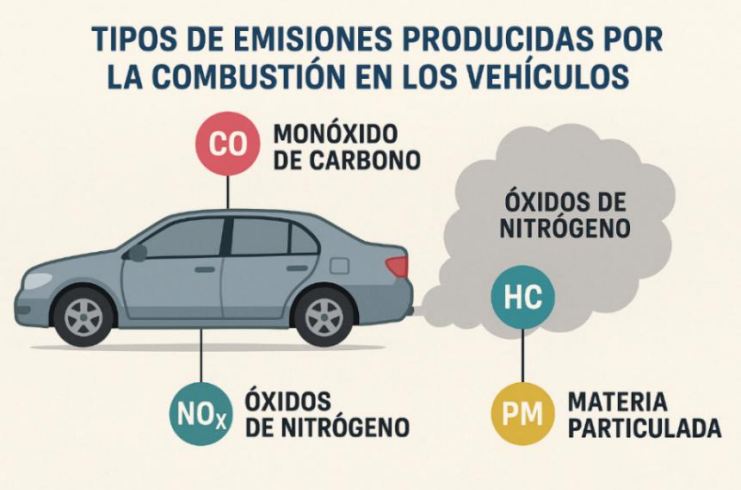


Figura 2. Emisiones contaminantes producidas por el vehículo.
(Google, 2025)

2.2. Formación de emisiones en motores de combustión

Las emisiones en un motor de combustión se forman debido a los procesos fisicoquímicos que ocurren durante el proceso de combustión. La combustión ideal de un motor se ve reflejada en una correcta relación estequiométrica en donde la mezcla de aire-combustible, evidenciado en la (Ecuación 1), produce gases no tóxicos tales como el CO_2, H_2O, O_2 (ACELA, 2020).

$$C_aH_b + \left(a + \frac{b}{4}\right)(O_2 + 3.773N_2) \rightarrow aCO_2 + \frac{b}{2}H_2O + 3.773\left(a + \frac{b}{4}\right)N_2$$

Ecuación 1

Donde:

C = Carbono

H = Hidrogeno

O = Oxigeno

N = Nitrógeno

a = número de átomos de carbono

b = número de átomos de hidrogeno

Sin embargo, debido a diversos cambios de temperatura constantes en el ambiente, a los tiempos de resistencia inadecuados, e incluso al diseño defectuoso no siempre se puede cumplir con esta relación, lo que conlleva a que los vehículos presenten problemas en el motor causando la existencia de una combustión incompleta, como se indica en la (Ecuación 2), la cual produce gases contaminantes como CO, HC, NO_x, los cuales si tienen un impacto directo en la vida de las personas y en el ambiente (Torres et al., 2024).

$$C_aH_b + x(O_2 + 3.773N_2) \rightarrow mCO_2 + nH_2O + qO_2 + rCO + pN_2 + otros\ productos$$

Ecuación 2

Donde:

C = Carbono

H = Hidrogeno

O = Oxigeno

N = Nitrógeno

a = número de átomos de carbono

b = número de átomos de hidrogeno

x = cantidad de oxígeno suministrado para el combustible

m = coeficiente estequiométrico correspondiente al dióxido de carbono

n = coeficiente estequiométrico correspondiente al agua

q = coeficiente estequiométrico correspondiente oxígeno

r = coeficiente estequiométrico monóxido de carbono

p = coeficiente estequiométrico nitrógeno

2.2.1 Normas de emisiones para el transporte vehicular

En los últimos años, los altos niveles de emisiones se han convertido en una de las principales preocupaciones debido a la producción de gases contaminantes que dañan el aire, el suelo y el agua. Estos efectos nocivos han llevado a un aumento significativo en

las tasas de mortalidad prematura, afectando a más de la mitad de la población a nivel mundial (Torres et al., 2024).

En Europa, la comisión europea denomina a estas normativas como “Euro”, dichas fueron creadas en 1988 con el único fin de establecer límites con respecto a las emisiones contaminantes producidas por los vehículos ya sean en motores a gasolina o motores diésel. Además de normas que tengan que ver con la fabricación y comercialización de vehículos en territorio europeo. Esta normativa se encuentra escrita con la palabra Euro acompañada de un número romano para el caso de los vehículos pesados, y de un número arábigo para los vehículos livianos (Bielaczyc et al., 2014). Por ejemplo, la Euro 1 fue establecida en 1992 con la intención de implementar el uso de catalizadores con el fin de reducir los gases de los vehículos (Napolitano et al., 2023). En la actualidad, se han legalizado siete normativas Euro, pero son seis las cuales se encuentran en vigencia.

Por otra parte, en Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental (EPA), es la encarga de prevenir y controlar los estándares de la contaminación tanto del aire como del agua mediante estándares, ya sea en la calidad del aire o los niveles de emisiones provenientes por los vehículos (Moniot et al., 2022). Fue fundada en 1970 como una agencia que fomenta el reciclaje en esta región, su enfoque dentro del campo automovilístico se basa en que las distintas empresas implementen en sus vehículos modelos eléctricos, ya que esto representaría un balance positivo con respecto a los niveles de emisiones producidos por los vehículos de combustión (Toro et al., 2024).

En Latinoamérica, la normativa sobre emisiones varía de un país a otro, pero de manera general, todos han adoptado regulaciones orientadas a la reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos, especialmente en los sectores del transporte y la industria. Por ejemplo, en Brasil, se ha implementado el Programa de Control de la Polución del Aire por Vehículos Automotores (Proconve)**,** cuya versión más reciente, Proconve L7, está alineada con los estándares europeos Euro 6. En México, la normativa relevante está compuesta por las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs)**,** siendo la más actual la NOM-042-SEMARNAT-2003, que está alineada con los requerimientos de la Euro 4. En conclusión, a pesar de que cada país cuente con su propia normativa nacional, estas regulaciones están en gran medida armonizadas con los estándares europeos de emisiones.

Por último, en Ecuador se aplican sus propias normativas de emisiones considerando las condiciones locales y desafíos que estos producen. Por ejemplo, en el sistema encargado

de establecer normas técnicas es conocido como INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). El INEN fue creado el 28 de agosto de 1970, con el fin de cumplir con las características de materiales y productos que se comercialicen en el país (CONTROL DE EMISIONES, 2008). En el caso de emisiones la normativa aplicada es la NTE INEN 2204, los cuales también se encuentran enlazados con los estándares europeos. Es por ello por lo que a partir de esta entidad se define reglamentos los cuales ayudan a controlar el nivel de emisiones contaminantes que son provenientes de fuentes móviles en este caso vehículos de combustión (Figura 3).

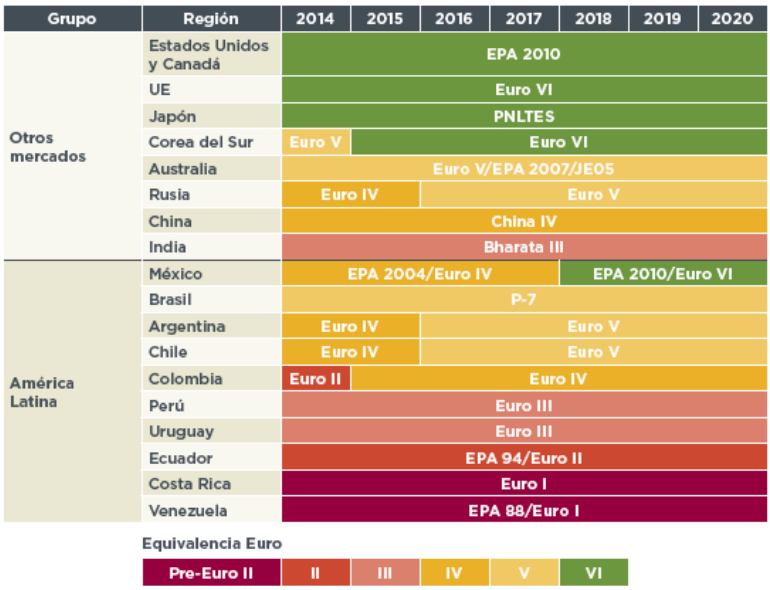


Figura 3. Estándares de emisiones para vehículos en varios países.
(International Council on Clean Transportation, 2014)

2.2.2 Cinemática del Vehículo

La cinemática es una rama de la mecánica que se enfoca en el análisis de los movimientos de los cuerpos sin considerar las fuerzas que los causan. Este campo de estudio se basa en el uso de variables como la velocidad y la aceleración, las cuales describen la variación de la posición de un objeto en función del tiempo (Bhandari et al., 2018). En el ámbito de la ingeniería automotriz, la cinemática se emplea para examinar el comportamiento dinámico de un vehículo en relación con el sistema de dirección, las ruedas y la geometría estructural del chasis (Figura 4). También se ven implícitos conceptos como el radio de giro, el ángulo de dirección y la dinámica que aportan las ruedas (Ma et al., 2024).

Bajo este mismo concepto, también es posible analizar la velocidad media en el contexto de la cinemática vehicular, ya que representa un parámetro crucial para la evaluación del

rendimiento durante un trayecto. El cálculo de la velocidad media permite estimar el tiempo de llegada, evaluar el impacto ambiental, y comprender su relación con la seguridad vial. Además, este indicador está estrechamente vinculado con la optimización del consumo de combustible, ya que influye directamente en la eficiencia energética y las emisiones de gases contaminantes generados por el vehículo.

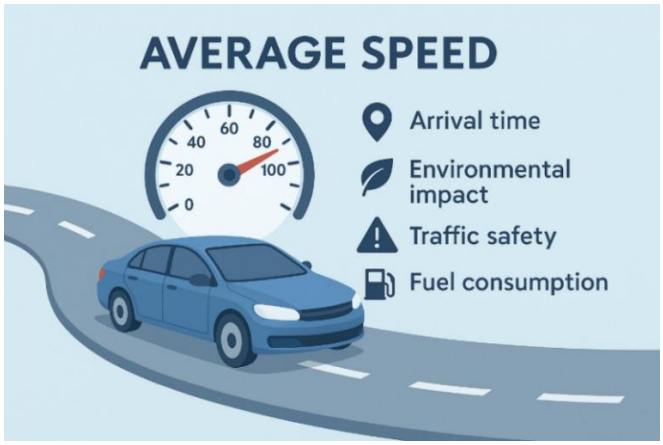


Figura 4. Impacto producido por la velocidad media.
(Google, 2025).

2.3 Fundamentos de las Intersecciones Semaforizadas

Una intersección se define como el punto de cruce entre dos o más vías, donde convergen flujos vehiculares que pueden generar distintos tipos de movimientos de tráfico. Este componente es esencial dentro de una red vial urbana, ya que desempeña un papel clave en la regulación de la seguridad, la eficiencia operativa y la fluidez del tránsito. Además, las intersecciones inciden directamente en los costos de operación del sistema de transporte, al influir en variables como el tiempo de viaje, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Existen diversos tipos de intersecciones a nivel, comúnmente denominadas intersecciones convencionales. Entre estas se incluyen las no reguladas, las intersecciones en "T" (de tres ramales) y las de cuatro ramales (Figura 5). Este tipo de intersecciones presenta ventajas como un diseño sencillo, una baja ocupación del suelo y menores costos tanto de construcción como de mantenimiento. No obstante, también presentan desventajas significativas, tales como una mayor probabilidad de accidentes de tránsito y una alta concentración de flujos vehiculares, lo que puede generar conflictos operativos y afectar la seguridad.



Figura 5. Tipos de intersecciones.
(Google, 2025)

También existen intersecciones de tipo reguladas las cuales son consideradas como semaforizadas, estas se encuentran regulada permanente mediante un sistema de luces, permitiendo el paso o la detención de los vehículos (Figura 6). Los semáforos son dispositivos de control de tráfico los cuales están diseñados para gestionar el flujo de tráfico vehicular y peatonal, con la finalidad de modular el nivel de servicio y precautelar la seguridad de todos los usuarios que usan la carretera (Di Stasi et al., 2022).



Figura 6. Intersecciones que se encuentra reguladas por un sistema de luces.
(Autoría Propia)

2.3.1 Congestión vehicular

La congestión de los vehículos es un problema muy frecuente en zonas urbanas. Una de las principales causas es el aumento de tráfico en horas pico las cuales son identificadas a mayor escala en intersecciones semaforizadas (Bhandari et al., 2018). Este impacto

negativo con respecto a la congestión genera que existan ineficiencia en el transporte (Figura 7), aumento en los tiempos de viaje, accidentes de tráfico, y aumento de costos en la gestión del tráfico. También esto se encuentra relacionado porque existe un desequilibrio entre la oferta y la demanda con la infraestructura vial. La demanda es referente al número de vehículos que desean transitar, mientras que la oferta es la capacidad que nos ofrece la infraestructura, lo que en el caso de la cuidad es mucho menor que la demanda.

Además, el que los vehículos permanezcan tanto tiempo en ralentí o estacionados produce que exista un aumento en el nivel de emisiones, empeorando así la contaminación ambiental, este tipo de factores es producido por un mayor consumo de combustible el cual no puede desarrollar una combustión completa, lo que conlleva a una disminución en la eficiencia del motor, puesto que produce una reducción significativa en la velocidad de circulación (Ma et al., 2024; Xu et al., 2024).



Figura 7. Congestión vehicular en la ciudad de Ibarra.
(Diario el Norte, 2020)

2.3.2 Parámetros fundamentales de tráfico

Los parámetros de tráfico se definen en una serie de factores o variables que se encuentran interrelacionadas con las características de operación de los vehículos. Estos parámetros ayudan a entender el comportamiento del tráfico, además de la eficiencia de los vehículos al momento de llegar a una intersección (Di et al., 2023). Existen tres parámetros fundamentales los cuales son: intensidad, velocidad y densidad.

2.3.2.1 Intensidad

La intensidad del tráfico es un parámetro fundamental en el análisis del flujo vehicular, ya que permite caracterizar su comportamiento de forma intuitiva a través de las oscilaciones en el volumen de tránsito, las cuales pueden presentar patrones cíclicos o aleatorios. Se define como el número de vehículos que transitan por un punto o segmento específico de una vía durante un intervalo de tiempo determinado, expresándose comúnmente en vehículos por hora (veh/h).

$$I = \frac{n(x)}{t}$$

Ecuación 3

Donde

I = Intensidad

n(x) = número de vehículos que atraviesan determinada sección

t = tiempo.

La intensidad del tráfico puede desagregarse en diversas categorías, cada una útil para distintos análisis de la demanda vehicular. Entre las principales se encuentran: la Intensidad Horaria Equivalente (IHE), la Intensidad Horaria (IH), la Intensidad Horaria Punta (IHP), la Intensidad Diaria (ID), la Intensidad Diaria Máxima (IDM) y la Intensidad Media Diaria Anual (IMDA). Estas clasificaciones permiten evaluar el comportamiento del flujo vehicular en distintos horizontes temporales y son fundamentales para la planificación y gestión del sistema vial, como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de intensidad

Tiempo	Tipo de intensidad
t <1	Intensidad horaria equivalente
1 hora	Intensidad horaria / horaria punta
1 dia	Intensidad diaria/ diaria máxima
1 año	Intensidad media diaria anual

(Autoría Propia)

A partir del análisis del volumen de tráfico en conjunto con la intensidad vehicular, es posible caracterizar el tipo de circulación presente en un determinado tramo vial. Esta

información resulta fundamental para evaluar la capacidad operativa de la vía, así como para diseñar e implementar estrategias de control de tráfico**,** coordinación semafórica **y** gestión de la circulación. Asimismo, estos datos permiten realizar un diagnóstico más preciso en cuanto a los **í**ndices de siniestralidad vial asociados a dicho tramo, facilitando la adopción de medidas orientadas a mejorar la seguridad y eficiencia del sistema de transporte (Sergio et al., s/f).

2.3.2.2 Velocidad

La velocidad por otra parte se denomina a la distancia que ha recorrido el vehículo en una unidad de tiempo (4).

$$v_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{\Delta t}$$

Ecuación 4

Donde

Vi = velocidad instantánea

di = posición instantánea

Δt= es la variación de tiempo.

El análisis de esta variable se llevará a cabo mediante la obtención de la velocidad media, la cual puede determinarse a través de dos enfoques: espacial o temporal. La velocidad media espacial se calcula considerando el tiempo que diferentes vehículos emplean en recorrer un tramo específico de la vía, mientras que la velocidad media temporal se obtiene a partir del promedio de las velocidades de los vehículos que pasan por un punto fijo durante un intervalo de tiempo determinado (Heni et al., 2024). El estudio de la velocidad resulta fundamental para estimar la calidad del servicio que ofrece la vía, particularmente en su interacción con intersecciones semaforizadas, ya que permite evaluar el nivel de fluidez del tránsito y su impacto sobre la operación del sistema vial.

2.3.2.3 Densidad

Esta variable representa el número de vehículos que se encuentran ubicados en cierto tramo de la carretera, dividido para la longitud existente en el mismo (5).

$$D = \frac{N}{L}$$

Ecuación 5

Donde

D = Densidad

N = es el número de vehículos que se encuentran en determinado tramo (vh)

L = es la longitud del tramo (km).

Al realizar un estudio sobre cómo influye la densidad con respecto al índice de tráfico se logra obtener datos de la calidad de circulación, lo que tiene que ver directamente con la velocidad de los vehículos, arranques, frenado y maniobras realizadas. Esta medida se la realizará cuando todos los vehículos se encuentren estáticos y en fila (Ingartek Consulting, 2021).

2.3.3 Ecuación fundamental del tráfico

Algunas de estas variables mencionadas están interrelacionadas, y su vínculo permite analizar fenómenos clave como la concentración, el flujo y la velocidad de los vehículos en una intersección. Este análisis se representa como:

$$I = D * V$$

Donde

I = representa la intensidad

D = la densidad

V = la velocidad

Por ende, podemos decir que el flujo de vehículos es igual al producto del número de vehículos en una unidad de longitud y por la velocidad. A través de estas comparaciones es posible identificar los puntos críticos en relación con el tráfico vehicular en una zona o carretera Se observa que, cuando el volumen de vehículos es reducido, las velocidades promedio tienden a ser más altas, lo que suele corresponder a tramos fluidos o autopistas. Sin embargo, a medida que aumenta la densidad vehicular, la velocidad promedio disminuye de forma proporcional. Este comportamiento evidencia una relación directa entre densidad y velocidad (Figura 8).

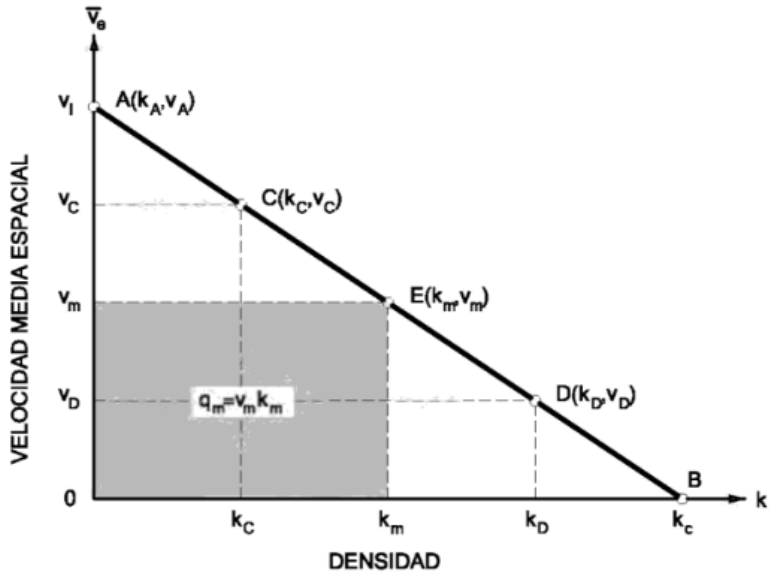


Figura 8. Relación entre la velocidad y la densidad.
(Rafael Cal y Mayor Reyes, 2018)

En situaciones donde la concentración de vehículos alcanza niveles elevados ya sea por factores como semáforos, accidentes u otros incidentes viales se genera lo que se conoce como congestión vehicular, caracterizada por una drástica reducción en la fluidez del tránsito (Figura 9)

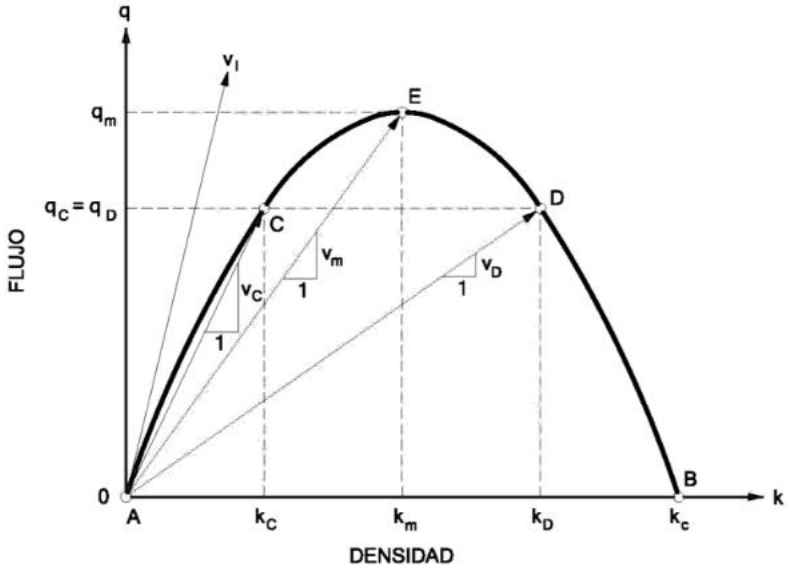


Figura 9. Relación entre la intensidad y la densidad.
(Rafael Cal y Mayor Reyes, 2018)

2.4 Teoría de colas

El término "colas" se refiere al desequilibrio temporal que surge cuando la demanda de un servicio o producto supera la capacidad del sistema que lo gestiona, fenómeno común en ámbitos como el comercio, transporte, industria o internet. La teoría de colas fue introducida en 1909 por el matemático Agner Krarup Erlang para analizar la congestión del tráfico telefónico en Copenhague (Jay Heizer, 1996);(Altumm, 2022). Esta teoría permite estudiar la longitud de las colas, los tiempos de espera y la capacidad del sistema, considerando tres aspectos principales: las llegadas al sistema (tamaño, comportamiento y distribución de la población), la disciplina de la cola (si es limitada o ilimitada), y las características de la instalación del servicio (diseño y distribución) (Figura 10); (Sergio et al., s/f).

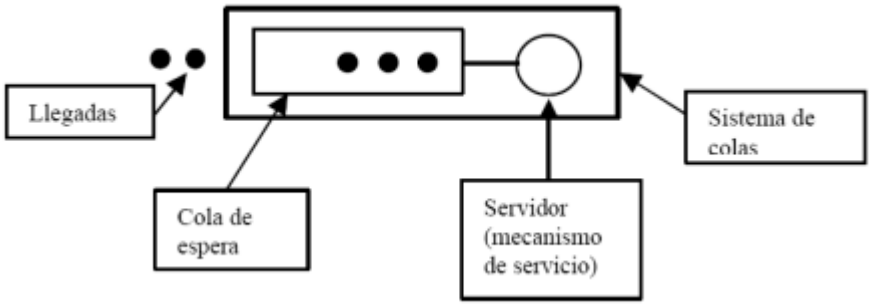


Figura 10. Esquema de un sistema de colas.

(Kleinrock, 1975).

2.4.1 Fuentes de entrada o llegadas

Las fuentes de entrada o llegadas se refieren al grupo de individuos que solicitan el uso de un servicio, como puede ser el caso en una intersección semaforizada. Estas fuentes se caracterizan principalmente por el tamaño del grupo de llegada, el cual puede considerarse finito o infinito dependiendo del volumen de la demanda. Otro aspecto importante es el comportamiento temporal de estas llegadas, que puede mantenerse constante en el tiempo (fuente estacionaria) o variar (fuente móvil). Esta clasificación permite modelar de manera más precisa el comportamiento del sistema de tránsito y anticipar cómo reaccionará ante diferentes condiciones de flujo vehicular (Cárdenas Grisales, 2018).

2.4.2 Cola

Por otro lado, la cola es donde los usuarios (o vehículos) esperan antes de recibir el servicio. Se caracteriza por dos factores principales: la capacidad total de la cola (es decir, cuántos vehículos pueden colocarse en la intersección) y la disciplina de la cola (es decir, el orden en que los usuarios serán atendidos). Existen tres tipos diferentes de disciplinas: FIFO (Primero en Entrar, Primero en Salir) en la que el primero en llegar será el primero; LIFO (Último en Entrar, Primero en Salir) en la que el último en llegar es atendido primero; y RSS (Servicio en Orden Aleatorio) en la que el orden de servicio será aleatorio. Estas disciplinas son importantes para la eficiencia del sistema de servicio y la experiencia del usuario, y también son esenciales para intersecciones señalizadas eficientes (Cárdenas Grisales, 2018).

2.4.3 Mecanismos de servicio

Un mecanismo de servicio se basa en un servidor encargado de atender a los usuarios que ingresan al sistema. Este mecanismo se clasifica en dos tipos: mono canal, cuando existe un único servidor, y multicanal, cuando el servicio es proporcionado por dos o más servidores simultáneamente. Por ejemplo, en el caso de los semáforos, se utiliza un solo canal para gestionar el paso de todos los vehículos detenidos en una intersección.

Este tipo de sistema requiere un análisis cuidadoso del tiempo de servicio, ya que es fundamental garantizar que los usuarios puedan salir del sistema en un tiempo razonable y evitar que la longitud de la cola crezca indefinidamente, lo que podría llevar a un colapso del sistema o, en este contexto, a una congestión vehicular. Por lo tanto, es esencial diseñar el sistema de manera que el tiempo de servicio sea igual o menor al intervalo promedio entre llegadas, asegurando así su estabilidad operativa.

2.4.4 Ciclos de trabajo de una intersección semaforizada

En una intersección semaforizada, los ciclos de trabajo se definen como el derecho de paso asignado a uno o varios movimientos específicos, ya sean vehiculares o peatonales, desde el punto de detención hasta el inicio del desplazamiento. Para calcular con precisión un ciclo de trabajo, es fundamental recopilar información detallada sobre el tránsito vehicular y peatonal, así como la programación semafórica vigente. Además, es necesario analizar diversos factores que inciden directamente en la operación del ciclo semafórico, tales como el flujo de saturación, el número de carriles disponibles, las variaciones del

volumen vehicular, así como la velocidad de aproximación y salida de los vehículos, entre otros (Transportation Research Board, 2016).

Dentro del ámbito de la ingeniería de tránsito, los ciclos de tráfico en intersecciones semaforizadas se refieren a la secuencia completa de tiempos que regula el cambio de las señales luminosas (rojo, ámbar y verde). Esta secuencia define la duración total del ciclo semafórico, y su configuración puede ser ajustada para responder a las condiciones del flujo vehicular en la intersección (Transportation Research Board, 2016).

El ciclo semafórico se compone de tres fases principales:

- Luz Verde: Indica el derecho de paso.
- Luz Ámbar (o Amarilla): Señal de advertencia de cambio inminente.
- Luz Roja: Indica la obligación de detenerse.

El tiempo asignado a cada fase puede variar dependiendo de factores como el volumen de tránsito, la geometría de la vía, la prioridad de movimientos, entre otros. No obstante, existen rangos de tiempo estándar utilizados como referencia en el diseño de sistemas semafóricos:

Tabla 2. Ciclos de funcionamiento de un semáforo

Fase	Duración
Verde	20 a 60 seg.
Ámbar	3 a 6 seg.
Rojo	Varía según el resto del ciclo

(Autoría Propia)

2.5 Fundamento de modelamiento de emisiones

El modelamiento de emisiones vehiculares es una herramienta fundamental para lograr estimar la cantidad de contaminantes que han sido liberados por un vehículo, sin la necesidad de tener que realizar actividades de mediciones reales en campo.

2.5.1 Enfoques para modelar emisiones vehiculares.

Los modelos de simulación se han convertido en una herramienta esencial para el análisis y para la representación de operaciones en sistemas de tráfico. Estos modelos permiten que exista un enfoque comúnmente conocido como aguas arriba o aguas abajo, que tiene un alcance diferente dependiendo del nivel de detalle requerido: macroscópico,

mesoscópico o microscópico. El enfoque macroscópico cubre grandes áreas (por ejemplo, países o continentes), mientras que el enfoque mesoscópico se centra en áreas intermedias (por ejemplo, regiones o ciudades). El enfoque microscópico se enfoca en partes específicas de la red vial (segmentos de calles, rotondas o intersecciones). Esta clasificación permite elegir el mejor tipo de modelo según los objetivos del estudio. (European Environment Agency, 2019).

2.5.2 Modelamiento de Tráfico Vehicular

Un modelo de tráfico es una herramienta matemática que permite simular, analizar y predecir el comportamiento del flujo vehicular en una red de transporte. Su propósito es representar de manera precisa el movimiento de los vehículos bajo diversas condiciones operativas, con el objetivo de optimizar, planificar y garantizar una movilidad urbana eficiente (Heni et al., 2024).

Por ejemplo, VISSIM es un simulador microscópico ampliamente utilizado en ingeniería de tráfico, que permite la modelación detallada de escenarios reales. Gracias a su capacidad para gestionar múltiples rutas, evaluar la viabilidad de proyectos viales y analizar la capacidad operativa de los carriles, VISSIM ofrece un alto nivel de precisión en la representación de sistemas de transporte complejos.

2.5.3 Modelamiento de Emisiones Vehiculares

El modelo de emisiones es una herramienta analítica utilizada para estimar tanto la cantidad como el tipo de contaminantes atmosféricos emitidos por vehículos. Este tipo de modelación se basa en parámetros similares a los utilizados en los modelos de tráfico, ya que ambos comparten variables como la velocidad, el flujo vehicular y las características operativas del entorno. No obstante, en el caso de los modelos de emisiones, el enfoque se centra en el cálculo preciso de los gases y partículas contaminantes generadas durante la operación vehicular (Heni et al., 2024).Estos modelos aplican factores de emisión específicos, los cuales pueden ser constantes o dependientes de variables como el tipo de vehículo, modo de conducción (urbano, rural o autopista), y el tipo de combustible utilizado. Entre las variables más relevantes, destaca la velocidad media del vehículo, ya que refleja el comportamiento dinámico durante el trayecto, incluyendo paradas, aceleraciones, desaceleraciones y arranques. Esta variable resulta fundamental para determinar con mayor precisión las emisiones generadas a lo largo del recorrido (Ding et al., 2024).

2.5.4 Combinaciones Posibles para el modelamiento

Según el tipo de estudio, existen tres métodos principales para la estimación de emisiones asociadas a la congestión vehicular. Estas metodologías se basan en diferentes enfoques analíticos y de modelado. Las combinaciones de estos métodos se encuentran descritas en la (Figura 11).

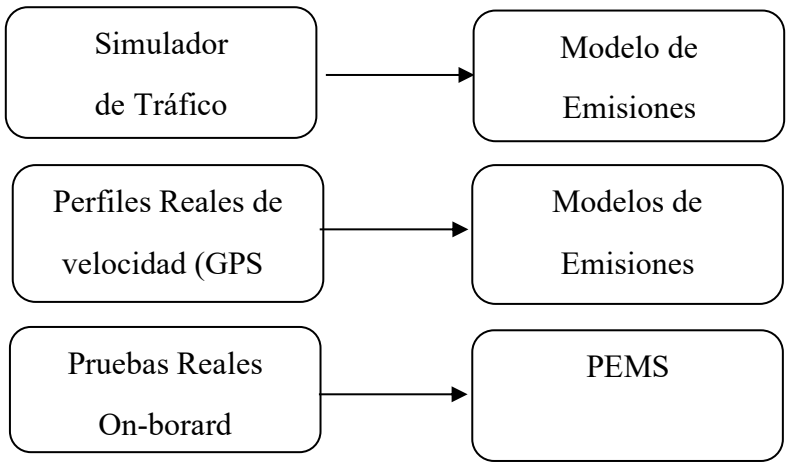


Figura 11. Combinaciones para el cálculo de factores de emisión.

(Autoría Propia)

Una de las principales ventajas de utilizar modelos es su capacidad para predecir el comportamiento de un sistema bajo diversos escenarios hipotéticos antes de que estos ocurran. No obstante, una de las principales limitaciones de estos modelos radica en la precisión y calidad de los datos de entrada, los cuales pueden afectar significativamente la confiabilidad de los resultados. Por otro lado, la recolección de datos empíricos mediante mediciones reales ya sea a través del uso de sensores o equipos especializados proporciona información altamente fiable (Ding et al., 2024). Sin embargo, este enfoque presenta desafíos importantes en términos de costos y tiempo requeridos para su implementación. No obstante, con el apoyo de software especializado, como el entorno estadístico R, es posible procesar y analizar estos datos de manera eficiente, rápida y con un alto grado de precisión.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta la metodología de la investigación. En la Figura 12 se muestra un flujograma con las principales actividades contempladas, así como la secuencia metodológica que se seguirá a lo largo del desarrollo del estudio. Incluye la descripción de los instrumentos, herramientas tecnológicas y programas empleados para el análisis de la cinemática y las emisiones en la intersección, así como el diseño de la campaña experimental, además se explica el proceso de recolección y análisis de datos.

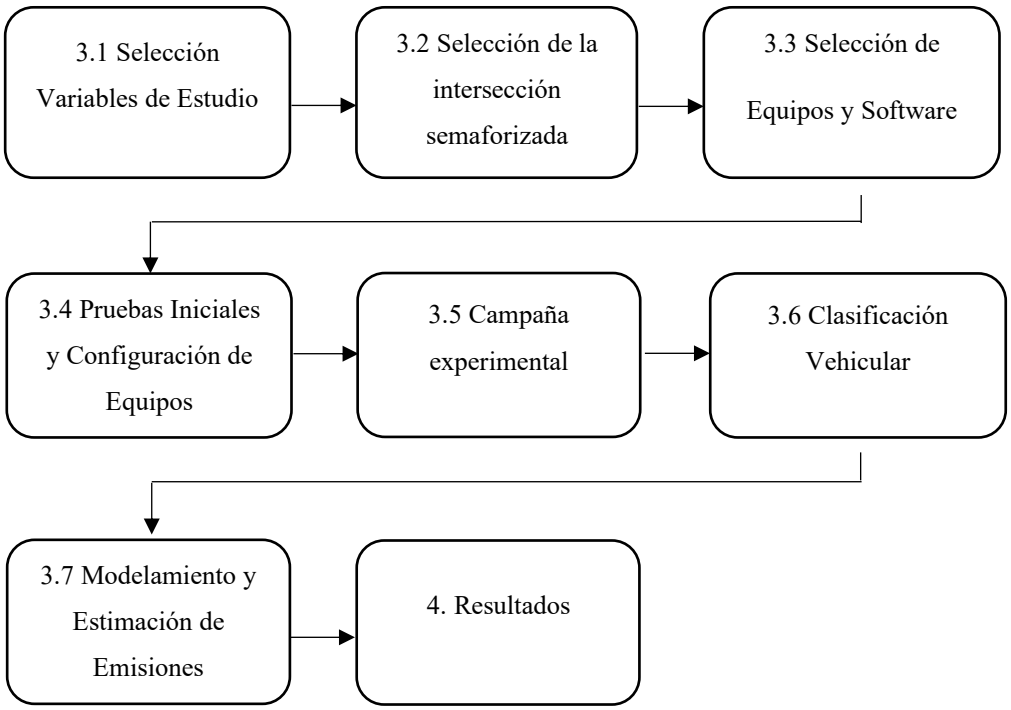


Figura 12. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación. (Autoría Propia)

3.1 Selección de Variables de Estudio

Con el objetivo de evaluar el comportamiento cinemático y las emisiones generadas por vehículos en condiciones reales de operación se definieron tres tipos de variables: (1) variables cinemáticas, (2) modos de operación y (3) variables de tráfico. La selección de estas variables permitió realizar un análisis detallado del desempeño vehicular al transitar

por una intersección controlada por semáforos. A continuación, se describen en detalle cada una de estas variables y su relevancia dentro del estudio.

3.1.1 Variables Cinemáticas

Para esta investigación fue necesario implementar variables cinemáticas para comprender la dinámica longitudinal de los vehículos al aproximarse, detenerse y cruzar por una intersección semaforizada y analizar como influyen aquello en el rendimiento del vehículo. Las variables ocupadas se detallarán junto con su unidad de medida correspondientes en la Tabla 3.

Tabla 3. Variables Cinemáticas

Variable	Unidad
Velocidad de aproximación	m/s
Distancia de frenado	m
Aceleración y desaceleración	m/s^2
Tiempo de cruce	s
Trayectorias y giros	$m - rad$

(Autoría Propia)

3.1.2 Modos de operación

Los principales modos de operación de un vehículo son: (1) ralentí (vehículo detenido), (2) aceleración, y (3) desaceleración, cada uno influenciado por la dinámica del semáforo y las condiciones del flujo vehicular. La determinación de los modos de operación del vehículo se basa principalmente en las variables cinemáticas descritas anteriormente. En la Tabla 4 se muestra cuáles son las condiciones y ecuaciones características por las cuales se manejan cada uno de los modos de operación de los vehículos.

Tabla 4. Modos de operación del vehículo

Modo de Operación	Condiciones Cinemáticas	Ecuaciones
Ralentí	$v = 0$ $a = 0$	$d = 0$ $v(t) = 0$
Aceleración	$a > 0.1\, m/s^2$ $v = creciente$	$v(t) = v_0 + a \cdot t$ $d(t) = v_0 \cdot t + ½ \cdot a \cdot t^2$
Desaceleración	$a < 0$ $v = decreciente$	$v(t) = v_0 + a \cdot t$ $d(t) = v_0 \cdot t + ½ \cdot a \cdot t^2$
Crucero	$a \approx 0$ $v = constante$	$v(t) = v_0$ $d(t) = v_0 \cdot t$

(Autoría Propia)

3.1.3 Variables de tráfico

El análisis de las variables del tráfico vehicular permite comprender las características y el comportamiento del flujo vehicular en una intersección semaforizada. En la Tabla 5 se presentan las variables consideradas para este estudio, junto con sus respectivas unidades de medida, las cuales servirán como base para la evaluación cinemática y operacional del tránsito en el área de estudio**.**

Tabla 5. Variables de Tráfico

Variable	Unidad
Intensidad	veh/h
Densidad	veh/km
Porcentajes de giro	%
Composición del parque vehicular	%

(Autoría Propia)

3.2 Selección de la intersección semaforizada

En la ciudad de Ibarra, la tasa del crecimiento del parque vehicular es del 8 % entre los años del 2014 a 2024 (EDISON ANDRÉS PUENAYÁN PIÑÁN, 2018). Este fenómeno ha derivado en un aumento considerable de la congestión vehicular, especialmente en zonas céntricas de la cuidad. Dentro de este contexto, las intersecciones controladas por semáforos han sido identificadas como puntos críticos donde se presenta mayor acumulación de tráfico, especialmente en horas pico. Esto debido al número de personas que se desplazan en vehículos particulares hacia sus actividades laborales, lugares culturales y de estudio.

Tomando en cuenta este contexto, se decidió seleccionar una intersección semaforizada situada en el centro de Ibarra. La elección de este punto específico respondió a dos criterios fundamentales: (1) la verificación del correcto funcionamiento del sistema semafórico, condición indispensable para garantizar la validez de los datos obtenidos; y (2) la proximidad a una entidad pública, lo cual facilitó el acceso a recursos esenciales como conectividad a internet y suministro eléctrico continuo para el funcionamiento del equipo de monitoreo.

3.2.1. Área de estudio seleccionada

La intersección seleccionada para el desarrollo de la presente investigación se encuentra localizada en la confluencia de las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo, tal como se ilustra en la Figura 13. La calle Simón Bolívar constituye una de las principales vías de la ciudad de Ibarra, caracterizándose por una elevada concentración de actividades comerciales, instituciones educativas y entidades gubernamentales. Por ejemplo, en las inmediaciones de esta intersección se encuentra el edificio del Municipio de Ibarra, así como un establecimiento comercial como es el supermercado Santa María, reconocido por los habitantes de la ciudad. Cabe destacar que en la esquina correspondiente a dicha intersección se sitúa la Prefectura de Imbabura, institución que brindó apoyo logístico al proyecto mediante el suministro de conectividad a internet y energía eléctrica, condiciones esenciales para el funcionamiento continuo de los dispositivos de monitoreo instalados en el área de estudio.

Por otro lado, la calle Miguel Oviedo también presenta relevancia en términos de flujo vehicular y actividad urbana, al encontrarse con instituciones financieras como la Mutualista Imbabura y diversos servicios complementarios, como una sala de velaciones ubicada en una de las esquinas de la intersección. Adicionalmente, a una distancia aproximada de 200 metros en una periferia se encuentran empresas de servicios básicos, entre ellas la Empresa Municipal de Agua Potable. Esta intersección fue seleccionada no solo por su representatividad urbana y complejidad operativa, sino también por contar con el espacio físico necesario para la instalación de cámaras y sensores requeridos para la recolección de datos.

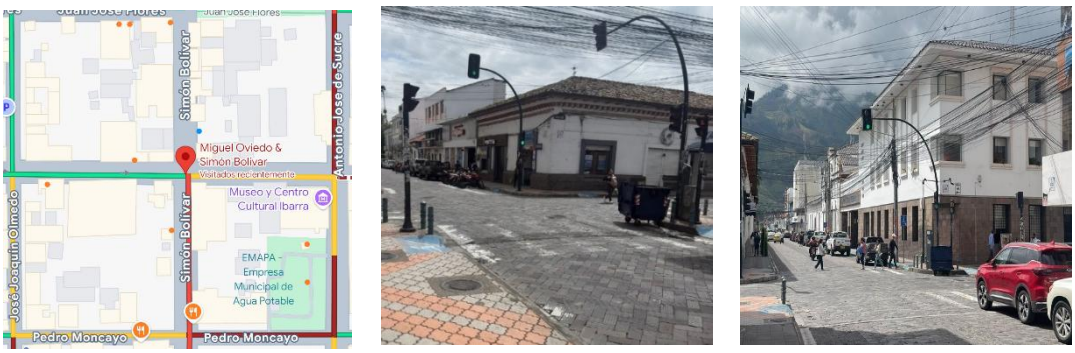


Figura 13. Intersección ocupada para la campaña experimental.
(Google Maps)

3.3 Selección de Equipos y Software

Para llevar a cabo una evaluación integral del comportamiento vehicular y sus impactos ambientales, fue necesario realizar una cuidadosa selección de equipos y softwares especializados. En la Figura 14 se muestra una clasificación general de los recursos técnicos utilizados, divididos en tres categorías principales: conteo de vehículos**,** medición de emisiones **y** herramientas de software**.**

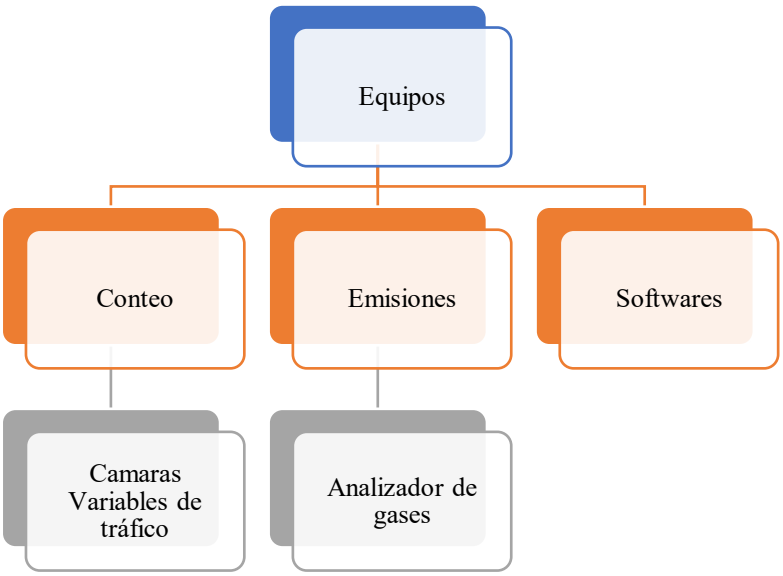


Figura 14. Equipos y Software según su variable.
Autoría Propia

3.3.1 Cámaras

Para esta investigación se seleccionaron dos tipos de cámaras, las cuales se describen a continuación junto con sus especificaciones técnicas y los motivos por los que se eligió una de ellas. Estos equipos fueron considerados debido a que permiten realizar el conteo de vehículos de forma más precisa y eficiente, ya que hacerlo de forma manual resulta complicado para obtener las diferentes variables requeridas en el análisis y con una variación mínima en los valores reales.

3.3.1.1 Cámara Hikvision iDS-TCD403-BI

Las cámaras de Hikvision en marca iDS-TCD403-BI mostradas en la (Figura 15) son dispositivos diseñados para aplicaciones de control y monitoreo del tráfico vehicular, ofreciendo una recopilación integral de datos operacionales. Estas cámaras permiten obtener estadísticas detalladas de los distintos carriles, incluyendo parámetros como el

flujo vehicular, la velocidad de los vehículos, el nivel de congestión (estado de la cola), el número de vehículos estacionados en el área monitoreada y el porcentaje de ocupación del tiempo (HIKVISION, 2022).

Una característica destacada de este modelo es su capacidad para realizar mediciones dentro de intervalos de tiempo configurables que van desde 1 segundo hasta 3600 segundos, lo cual permite una alta flexibilidad en la planificación y análisis de campañas experimentales de tráfico.



Figura 15. Cámara Hikvision iDS-TCD403-BI.
(Google, 2025)

Una de las principales ventajas de estas cámaras es su capacidad para realizar una recolección de datos más amplia y precisa, gracias a su resolución de 4 megapíxeles. Este nivel de definición permite una visualización simultánea de múltiples objetivos en hasta seis carriles bidireccionales con cobertura vertical, lo que resulta ideal para entornos urbanos con alto flujo vehicular.

No obstante, entre las desventajas de este tipo de dispositivos se encuentra su alto costo, que se sitúa en un rango aproximado de 900 a 1000 USD por unidad. Además, para habilitar la funcionalidad de rastreo y almacenamiento de video, es indispensable el uso de un DVR (Digital Video Recorder), cuyo costo adicional es de alrededor de 250 USD. A esto se suma el costo de instalación e infraestructura, que también representa una inversión considerable, especialmente si se requiere adaptar el entorno para garantizar condiciones óptimas de funcionamiento.

3.3.1.2 Cámara Dahua Access ANPR

Las cámaras Dahua Access ANPR mostradas en la (Figura 16), son dispositivos de videovigilancia equipados con algoritmos de reconocimiento inteligente que permiten la detección automática de vehículos, así como la identificación de características específicas como el tipo de vehículo, su color y marca. En el marco de esta investigación, dichas cámaras fueron empleadas para la recolección automatizada de datos de tráfico, funcionando como un sistema de conteo vehicular que permite registrar de forma precisa

el número de vehículos que atravesaron la intersección analizada (Dahua Technology, 2023).



Figura 16. Cámara Dahua Access ANPR.
(Google, 2025)

Una de las principales ventajas de estos dispositivos es su costo reducido, que oscila entre 450 y 600 USD, lo cual representa una alternativa más accesible en comparación con otros equipos de análisis de tráfico. Además, su instalación es considerablemente más sencilla, ya que no requieren de un DVR para la recolección de datos. En su lugar, utilizan memorias microSD, lo que permite almacenar la información localmente sin necesidad de infraestructura adicional compleja.

Sin embargo, entre sus limitaciones se encuentra una resolución inferior, generalmente de 2 megapíxeles, lo cual restringe la capacidad de detección y análisis en escenarios con alta densidad vehicular ya sea el caso de 4 a 6 carriles. Asimismo, no cuentan con funcionalidades integradas para el análisis completo del tráfico en tiempo real, como la detección de congestión, cálculo de velocidad o medición del flujo vehicular, lo que limita su aplicación en estudios cinemáticos detallados.

Para el desarrollo de la presente investigación, se optó por utilizar este tipo de cámaras debido a que permiten obtener datos básicos del flujo vehicular, los cuales son necesarios para ser integrados en el software de simulación empleado en el análisis. Si bien estos dispositivos no proporcionan un análisis completo del tráfico en tiempo real, su funcionalidad resulta suficiente para los requerimientos de esta etapa del estudio. Además, se implementará un conteo manual de vehículos en campo, con el objetivo de realizar comparaciones y validar la precisión de los datos obtenidos mediante las cámaras, asegurando así la fiabilidad de la información utilizada en la simulación.

3.3.2. Medidor de concentración de emisiones

Un medidor de concentración de emisiones es un equipo especializado utilizado para cuantificar los niveles de contaminantes emitidos por los vehículos durante la operación de muestreo. Este instrumento permite detectar y medir en tiempo real gases como

dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), entre otros compuestos presentes en los gases de escape.

3.3.2.1 AirGradient Open Air

El AirGradient Open Air mostrado en la (Figura 17) es un sensor ambiental diseñado para la medición en tiempo real de contaminantes atmosféricos. Este equipo permite el monitoreo de parámetros como $\boldsymbol{PM2.5}, \boldsymbol{PM10}, \boldsymbol{CO^2}$, la temperatura y la humedad, con la capacidad de transmisión de datos en tiempo real a través de interfaces inalámbricas (AirGradient Ltd, 2024).

En el contexto de esta investigación, se utilizaron dos unidades para registrar datos ambientales asociados a las emisiones vehiculares en la zona de estudio. Su integración permitió correlacionar la información cinemática obtenida en la simulación del software con los niveles de contaminantes reales que se detecten en la intersección proporcionando así una visión más completa del impacto ambiental del flujo vehicular.



Figura 17. Medidor de Gases AirGradient Open Air.

(Google, 2025)

3.3.3 Programas para el Modelación de Tráfico y Emisiones

Para llevar a cabo esta investigación, fue necesario realizar un estudio previo de los distintos softwares disponibles para la simulación de tráfico y emisiones. Este análisis permitió clasificar y comparar las herramientas existentes, identificando sus principales ventajas y desventajas en función de los requerimientos del proyecto. El objetivo fue seleccionar la plataforma más adecuada para procesar y analizar de forma efectiva los datos proporcionados por las cámaras utilizadas en campo, garantizando así la coherencia

y la fiabilidad de los resultados. A continuación, describiremos los tipos de softwares existentes además de sus características y su funcionalidad.

3.3.3.1 Software SUMO

SUMO es un software de simulación de tráfico microscópico y multimodal de código abierto tal como se ve en la Figura 18, fue desarrollado para modelar de manera detallada la dinámica del tráfico vehicular. Su carácter multimodal permite simular distintos tipos de transporte, incluyendo vehículos motorizados, bicicletas, transporte público y peatones, lo cual lo convierte en una herramienta versátil para el análisis integral de sistemas de movilidad urbana.

SUMO incorpora un conjunto de herramientas especializadas que permiten la generación y edición de redes viales, la definición de escenarios de tráfico y el cálculo automático de rutas optimizadas para los distintos modos de transporte (P. Álvarez López, 2018). Además, las simulaciones pueden ser ejecutadas tanto mediante una interfaz gráfica de usuario como a través de una línea de comandos, lo que ofrece flexibilidad para usuarios con distintos niveles de experiencia y necesidades de automatización (P. Álvarez López, 2018).

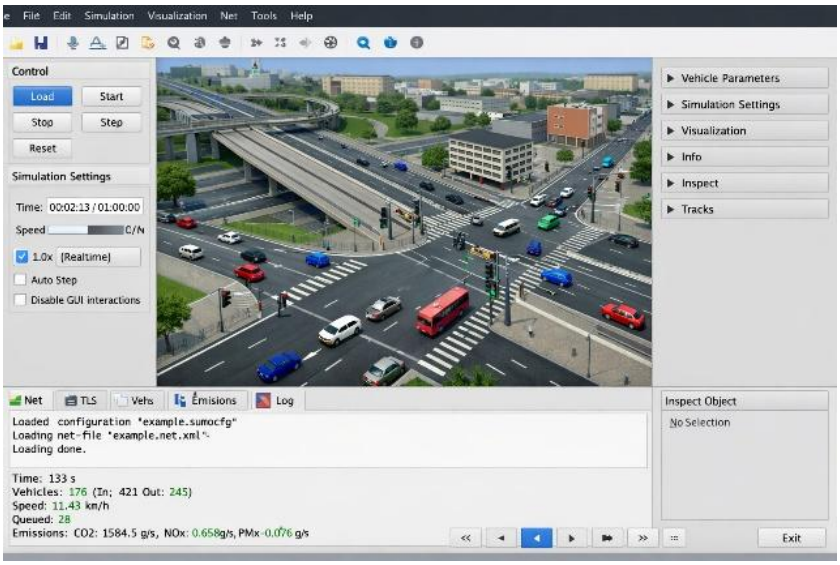


Figura 18. Software Sumo.
(Google, 2025)

3.3.3.2 Software Vissim

PTV VISSIM es un software de simulación que permite representar con alta precisión la dinámica individual de los vehículos, incluyendo aceleración, frenado, cambio de carril

y respuesta a semáforos u otros elementos de control tal como se muestra en la Figura 19. En el presente estudio, fue utilizado como herramienta principal para la simulación cinemática de los vehículos que circulan por la intersección evaluada, así como para la estimación de emisiones contaminantes generadas en distintos escenarios de flujo. Su uso permitió analizar el impacto de las variaciones en la demanda vehicular según su hora transitada además de poder conocer parámetros como la velocidad promedio, densidad de tráfico y emisión de partículas, proporcionando así una base cuantitativa para la evaluación de posibles estrategias de mejora en la gestión del tránsito (PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2024).

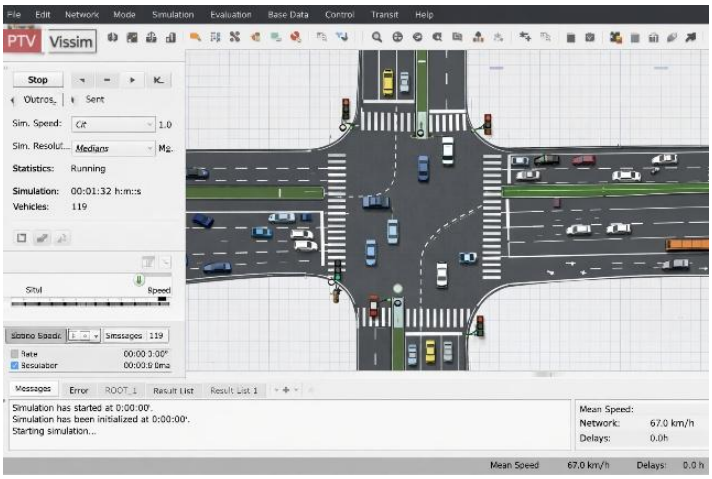


Figura 19. Software Vissim
(Google, 2025)

3.3.3.3 Software de Emisiones

También fue necesario realizar un análisis exhaustivo de distintos softwares especializados en la estimación y gestión de emisiones, con el objetivo de seleccionar la herramienta más adecuada para medir, controlar, reportar y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Dado que el mercado ofrece múltiples alternativas, se llevó a cabo una evaluación comparativa de las principales opciones disponibles. A continuación, se describen las características técnicas de cada uno de estos programas, junto con un análisis de sus ventajas y desventajas.

3.3.3.4 Simulador MOVES

El simulador MOVES mostrado en la Figura 20 es una herramienta desarrollada para estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos de vehículos motorizados. Es

ampliamente utilizado en estudios de calidad del aire, planificación del transporte, e investigaciones ambientales (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

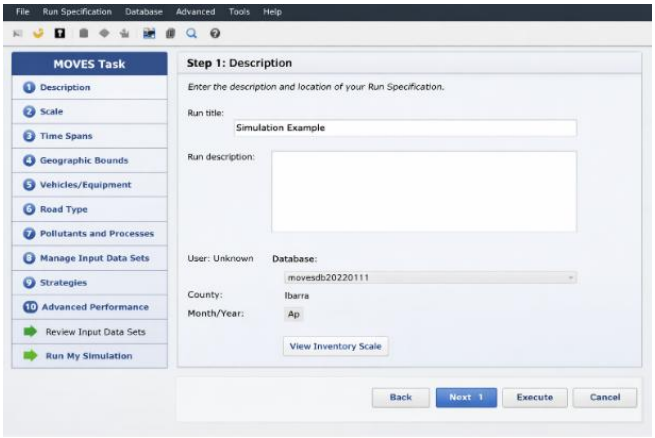


Figura 20. Simulador MOVES
(Google, 2025)

Este software se caracteriza por su capacidad para estimar con alta precisión diversos tipos de emisiones contaminantes, tales como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM). Entre sus principales ventajas se destaca su método de trabajo, así como su versatilidad para ser aplicado en diferentes contextos analíticos, incluyendo inventarios de emisiones, evaluaciones de impacto ambiental y análisis de escenarios en el transporte. No obstante, presenta ciertas limitaciones, entre las que se incluyen una interfaz de usuario compleja y la necesidad de ingresar datos altamente específicos lo que puede dificultar su adaptación a otras realidades geográficas sin una calibración previa.

3.3.3.5 Simulador COPERT

El simulador COPERT mostrado en la Figura 21. A diferencia de MOVES, el cual fue desarrollado específicamente para estimar emisiones en el contexto del modelo vehicular de los Estados Unidos, este software está diseñado para la elaboración de inventarios de emisiones en el ámbito europeo. Una de sus principales fortalezas radica en su extensa base de factores de emisión, que incorpora variables como el tipo de vehículo, tipo de combustible, normas de emisiones euro, condiciones operacionales, entre otros. Además, permite la realización de análisis macroscópicos con un enfoque integral del parque vehicular (European Environment Agency (EEA), 2025). No obstante, entre sus principales limitaciones se encuentra su menor nivel de detalle en el análisis a escala microscópica, ya que no contempla la simulación de trayectorias vehiculares individuales ni es adecuado para procesos de micro simulación directa.

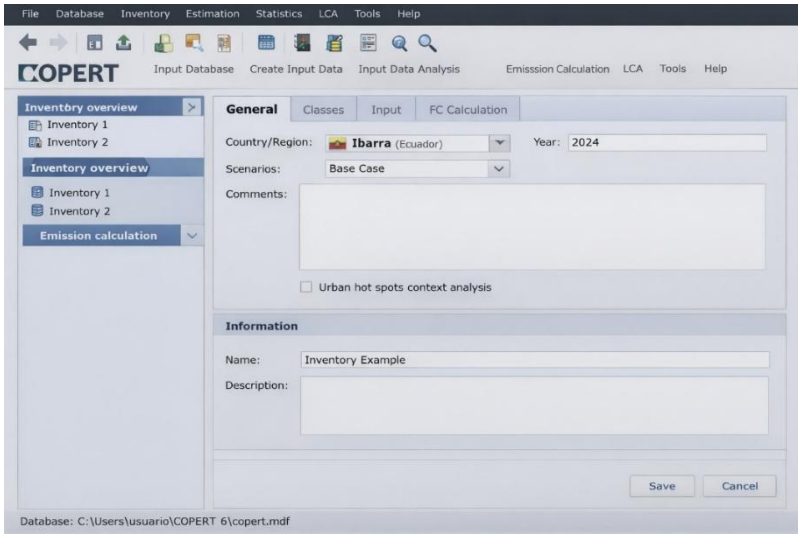


Figura 21. Simulador COPERT
(Google, 2025)

A pesar de la existencia de simuladores especializados en la estimación directa de emisiones, se optó por utilizar el software VISSIM debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre la dinámica vehicular. Si bien VISSIM no calcula emisiones de forma nativa, permite obtener variables cinemáticas precisas como velocidades instantáneas, aceleraciones y tiempos de detención que, al ser procesadas con los parámetros adecuados y combinadas con los datos recolectados a través de cámaras, pueden ser utilizadas como insumo para la estimación de emisiones. Esta integración resulta adecuada para los fines de la presente investigación, centrada en el análisis cinemático y de emisiones en una intersección semaforizada.

A continuación, en la Tabla 6 se muestra una comparación entre los diferentes softwares utilizados para el análisis de tráfico y de emisiones, destacando sus principales ventajas y desventajas, así como las razones por las que cada uno puede resultar adecuado para una investigación.

Tabla 6. Ventajas y Desventajas de los simuladores de Tráfico y Emisiones

Tipo	Ventajas	Desventajas
SUMO	✓ Software de Código abierto y gratuito. ✓ Permite simulación detallada de tráfico y movilidad. ✓ Compatible con múltiples herramientas externas.	✓ Requiere conocimientos técnicos para su configuración. ✓ Interfaz menos amigable en comparación con otros.
	✓ Alta precisión en el modelado del comportamiento del tráfico.	✓ Requiere licencia paga.

VISSIM	✓ Buena integración con herramientas como MATLAB y Python. ✓ Ideal para análisis de intersecciones complejas.	✓ Curva de aprendizaje elevada.
MOVES	✓ Modelo oficial de la EPA para estimaciones de emisiones. ✓ Amplia base de datos incorporada. ✓ Fácil de usar con interfaz gráfica.	✓ Enfocado principalmente al contexto de EE. UU. ✓ No simula tráfico, requiere datos previos.
COPERT	✓ Estándar europeo para cálculo de emisiones. ✓ Fácil de usar con interfaz simple. ✓ Apto para reportes nacionales y regionales.	✓ Requiere datos agregados y estadísticos. ✓ No incluye dinámica de tráfico.

3.4 Pruebas Iniciales y Configuración de Equipo

Previo al inicio de las mediciones de la campaña experimental, se llevaron a cabo una serie de pruebas iniciales con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento e integración de los equipos seleccionados. Estas pruebas permitieron validar tanto la precisión en la recolección de datos como la sincronización entre los distintos dispositivos. Este procedimiento fue de gran aporte para definir el registro de datos que serán ocupados en la campaña experimental.

3.4.1 Cámaras

Las cámaras Dahua fue de los primeros dispositivos en instalar y poner a punto en nuestra investigación ya que representa la mayor parte del proceso por sus altas condiciones para su optimo funcionamiento.

3.4.1.1 Instalación de Cámaras

Para llevar a cabo la instalación de las cámaras de monitoreo, fue necesario en primer lugar adquirir tarjetas de memoria, ya que los dispositivos no contaban con un sistema de grabación digital (DVR) adicional. Estas tarjetas permiten el almacenamiento local de las grabaciones generadas por las cámaras. La instalación física se realizó en una esquina de la intersección, utilizando dos tubos metálicos como soporte estructural. Esta configuración permitió posicionar las cámaras a una altura y orientación óptimas,

mejorando el ángulo de visión y cobertura del área de interés como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Conexiones pertinentes en la instalación de cámaras
(Autoría Propia)

Esta ubicación estratégica fue seleccionada con el objetivo de evitar interferencias visuales generadas por los vehículos que se estacionan frecuentemente en la zona. Una fijación directa a la pared hubiera limitado el campo visual y reducido la efectividad del sistema. Adicionalmente, se requirió el tendido de cableado para la alimentación eléctrica y la conectividad a la red. Para ello, se utilizaron aproximadamente 15 metros de cable por cada cámara, dado que este era el punto de conexión más cercano disponible. El cableado fue canalizado de forma segura para garantizar tanto la protección del sistema como su operatividad continua como se ve en la Figura 23.



Figura 23. Cable ocupado para lo conexión de red
(Autoría Propia)

3.4.1.2 Funcionamiento

Una vez completada la instalación física de las cámaras, se procedió a realizar las pruebas iniciales de funcionamiento. Para ello, se verificó que cada cámara encendiera correctamente al ser conectada a la red eléctrica y que respondiera adecuadamente a los

comandos del sistema. Durante esta etapa, se identificaron algunos inconvenientes relacionados con el reconocimiento de las tarjetas de memoria insertadas. Las cámaras no detectaban correctamente las unidades de almacenamiento, lo que impedía el inicio del registro de datos. Ante esta situación, se solicitó la asistencia de un técnico con mayor experiencia en el manejo de este tipo de dispositivos. El técnico colaboró en la correcta instalación y configuración de las tarjetas de memoria, asegurando su compatibilidad con el sistema como se muestra en la Figura 24.

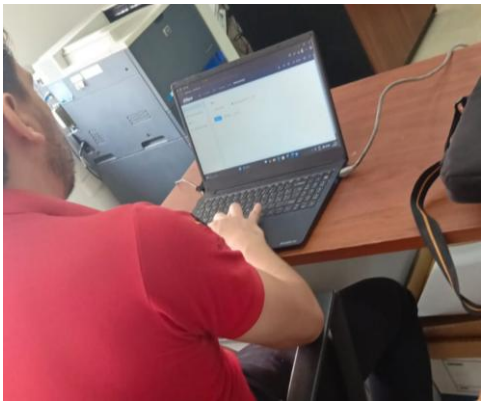


Figura 24. Configuración de Sistema de las cámaras
(Autoría Propia)

Solucionado este inconveniente, se logró que cada cámara iniciara adecuadamente el proceso de captura y almacenamiento de datos, incluyendo el registro de placas vehiculares y la clasificación básica de tipos de vehículos tal y como se ve en la Figura 25. Esto permitió continuar con las etapas posteriores de configuración del sistema y verificación de su operatividad.

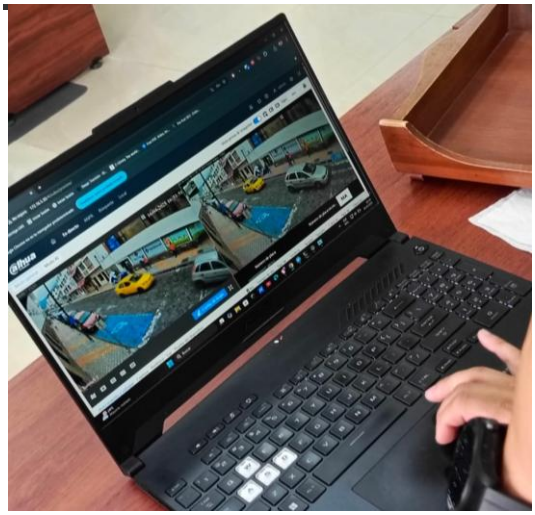


Figura 25. Proceso de conteo de Vehículos mediante las cámaras
(Autoría Propia)

3.4.1.3 Verificación de Conteo y Tipo

Para verificar el correcto funcionamiento de cada una de las cámaras instaladas, se llevaron a cabo pruebas piloto controladas. Estas pruebas consistieron en realizar un conteo manual del flujo vehicular durante un período de 10 minutos, el cual fue comparado con el conteo automático generado por cada cámara en el mismo intervalo de tiempo con el objetivo de evaluar la precisión del sistema en la detección y registro de vehículos. Las pruebas se realizaron de manera individual para cada cámara, a fin de identificar posibles discrepancias y validar su desempeño de forma independiente. Los resultados obtenidos en estas pruebas se detallan en la Tabla 7 y Tabla 8 que son de las respectivas calles de la intersección.

Tabla 7. Toma de Datos en la Calle Simón Bolívar

No.	Tiempo Instantáneo	Licencia NO
1	22/4/2025 6:01	111
2	22/4/2025 6:03	FDD8260
3	22/4/2025 6:08	8681
4	22/4/2025 6:10	AAJJ3
5	22/4/2025 6:10	2466
6	22/4/2025 6:11	EA511
7	22/4/2025 6:12	E9735
8	22/4/2025 6:13	FD1133
9	22/4/2025 6:14	IEC11
10	22/4/2025 6:14	PE116

(Autoría Propia)

Tabla 8. Toma de Datos en la Calle Oviedo

No.	Tiempo Instantáneo	Licencia NO
1	25/4/2025 6:05	Sin placa
2	25/4/2025 6:07	IBB224
3	25/4/2025 6:08	86019
4	25/4/2025 6:10	47
5	25/4/2025 6:10	10
6	25/4/2025 6:11	Sin placa
7	25/4/2025 6:13	AAA21

8	25/4/2025 6:13	SKL7
9	25/4/2025 6:13	GSB6891
10	25/4/2025 6:15	FDT1839

(Autoría Propia)

3.4.1.4 Configuración de Cámara

Las cámaras Dahua Access ANPR fueron configuradas para operar en modo automático para determinar el tipo de vehículos, el tiempo, y el tamaño de este como en la Figura 26, estableciendo zonas de interés específicas en la intersección a estudiar. Se ajustaron parámetros como la sensibilidad de captura y resolución de imagen.

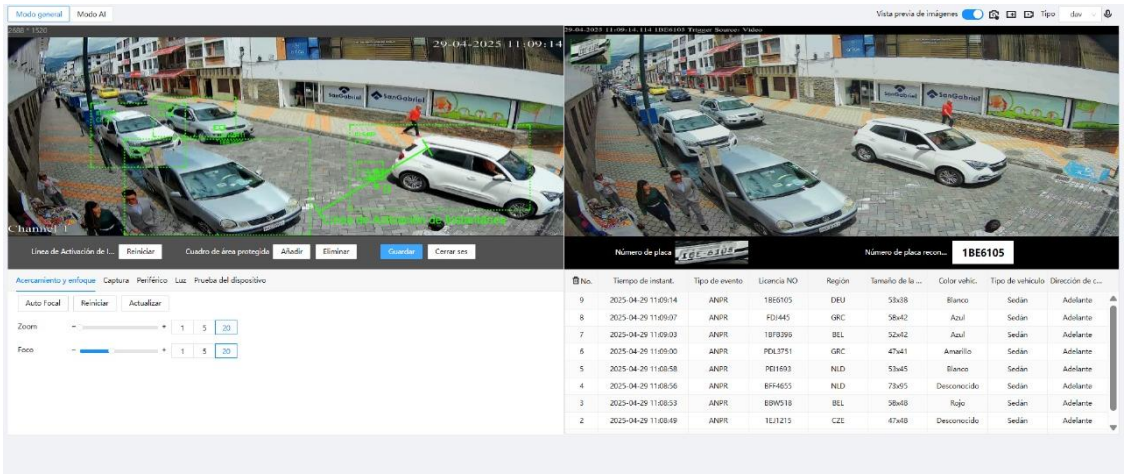


Figura 26. Configuración de las cámaras
(Autoría Propia)

Además de la configuración de los parámetros operativos requeridos para la investigación, fue necesario establecer adecuadamente el sistema de almacenamiento de datos. Esta configuración permitió asegurar la integridad y organización de la información recolectada, facilitando su posterior análisis.

3.4.1.5 Configuración de ConfigTool

Para la configuración inicial y puesta en marcha de las cámaras Dahua Access ANPR, se utilizó el software Dahua ConfigTool, una herramienta oficial que permite la detección automática de dispositivos Dahua en red, así como la modificación de parámetros clave de configuración como se ve en la Figura 27. Con esta aplicación se realizó la asignación de direcciones IP estáticas a cada cámara, garantizando una comunicación estable con la red de adquisición de datos, la sincronización horaria mediante protocolo NTP para asegurar la coherencia temporal en los registros. También se logró la verificación del

firmware y actualización en caso de ser necesario, la configuración inicial de zonas de detección y parámetros de reconocimiento de matrículas, necesarios para el funcionamiento óptimo del algoritmo ANPR.

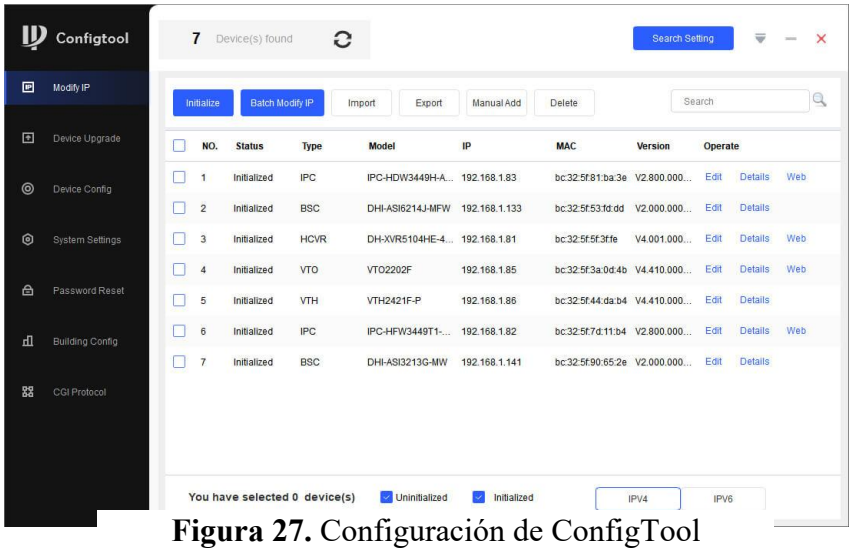


Figura 27. Configuración de ConfigTool
(Autoría Propia)

3.4.2 Medidor de Concentración de Emisiones

Son pequeños dispositivos que se pueden acoplar a pequeñas estructuras, fueron los segundos dispositivos en ser instalados, puesto que necesitaban de las cámaras para su funcionamiento.

3.4.2.1 Instalación

La instalación del medidor se realizó directamente en las cámaras, aprovechando que el dispositivo requería una alimentación mínima, la cual podía ser suministrada a través de uno de los puertos auxiliares que las cámaras ofrecen como se muestra en la Figura 28. Esta solución permitió optimizar el cableado y reducir la necesidad de fuentes de alimentación externas adicionales.



Figura 28. Instalación del Medidor de Emisiones
(Autoría Propia)

Para asegurar la estabilidad física del medidor, se utilizó el mismo sistema de soporte implementado previamente con los tubos metálicos que sostienen las cámaras. Esta estructura proporcionó un punto de anclaje adecuado, garantizando tanto la seguridad del dispositivo como su correcta orientación para el monitoreo.

3.4.2.2 Funcionamiento

Para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo Air Gradient Open Air, se llevó a cabo una evaluación utilizando la aplicación oficial proporcionada por el fabricante. Esta plataforma permitió monitorear en tiempo real las mediciones de los distintos gases configurados en el sensor, validando así la precisión y operatividad del equipo bajo condiciones controladas. Una de las ventajas del Air Gradient Open Air es que no requiere de dispositivos de almacenamiento externo, como tarjetas microSD, ya que los datosrecolectados son transmitidos automáticamente a la nube mediante la aplicación instalada en un computador. Esto permite una gestión más eficiente de la información, facilitando tanto el acceso remoto a los datos como su respaldo y análisis posterior sin necesidad de intervención manual.

3.4.2.3 Verificación

Para llevar a cabo la verificación del dispositivo Air Gradient Open Air, se realizó una simulación rápida que permitió obtener datos preliminares sobre su funcionamiento. Esta prueba fue suficiente para confirmar que el equipo operaba correctamente y que los sensores respondían de forma adecuada a las condiciones del entorno, tal como se muestra en la Figura 29.

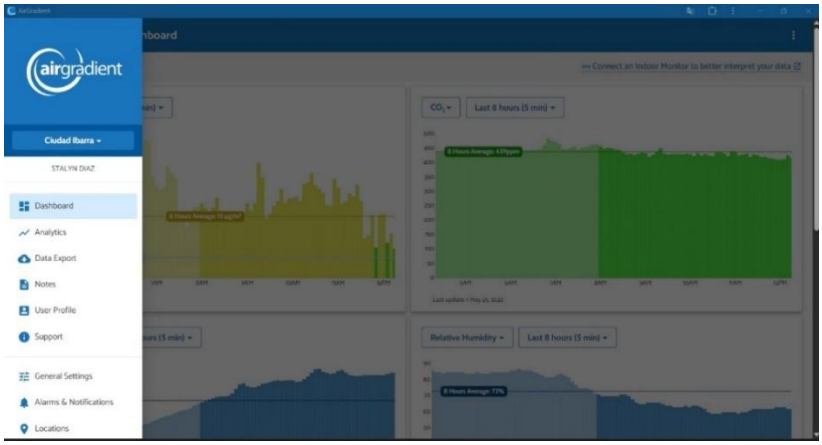


Figura 29. Muestras tomadas del Medidor de Emisiones
(AirGradient, 2026)

Durante este proceso, también se identificaron y configuraron los tipos de gases que serían medidos por el dispositivo, permitiendo su integración directa con el software desarrollado en este proyecto. Esta compatibilidad facilita la recolección, procesamiento y análisis de los datos ambientales obtenidos, optimizando así el sistema de monitoreo.

3.4.2.4 Configuración de AirGradient Open Air

Por su parte, los sensores fueron instalados en puntos estratégicos con condiciones representativas del entorno, y se calibraron de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Se verificó la frecuencia de muestreo a 1 Hz y la transmisión correcta de los datos mediante la plataforma en línea del sensor. Se lo instalo cerca de las cámaras esto para verificar la información proporcionada por los dos dispositivos que se encuentran vinculados.

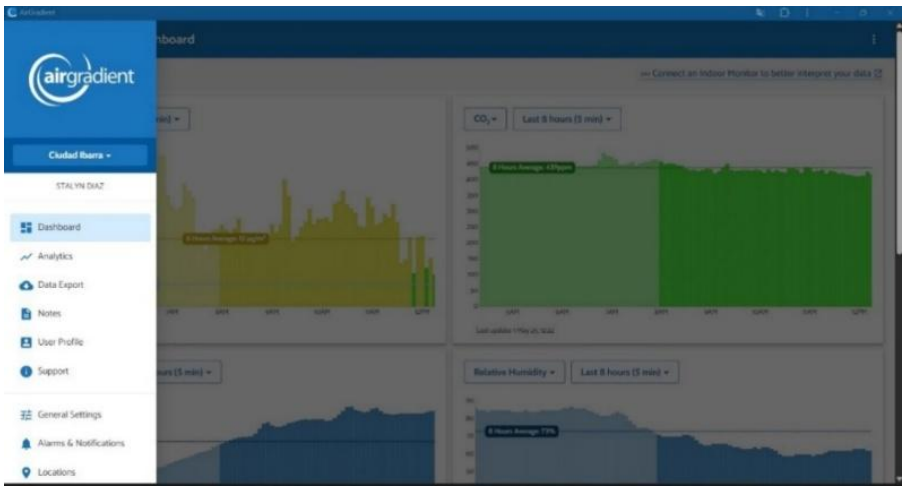


Figura 30. Configuración Air Gradient
(AirGradient, 2026)

3.4.3. Modelo de Tráfico: Cinemático y Emisiones

El modelo de tráfico fue parte fundamental de esta investigación, debido a su eficiencia para poder obtener datos cinemáticos y de emisiones para su respectivo análisis mediante el uso de dicha interfaz.

3.4.3.1 Instalación

Para la instalación del software requerido en este modelo, fue necesario utilizar un disco duro externo, ya que el sistema operativo del dispositivo no contaba con la capacidad suficiente para soportar el peso del programa de forma interna. Este disco externo sirvió como unidad de almacenamiento principal para completar la instalación de manera eficiente y sin comprometer el rendimiento del sistema. Como parte del proceso de instalación del software requerido, se accedió al sitio web oficial de **PTV Vissim**, desde donde se descargó la aplicación correspondiente al Vision Traffic Suite como se logra ver en la Figura 31. Es importante señalar que con esta versión y con la licencia obtenida, se presenta un uso completo de todas las funciones del simulador. ofreciendo los puntos necesarios para el desarrollo de los análisis y simulaciones planteadas en el presente trabajo de investigación.

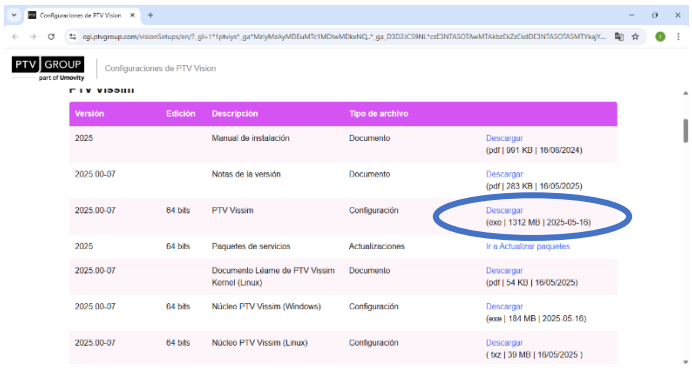


Figura 31. Descarga de aplicación
(PTV Group, 2025)

3.4.3.2 Funcionamiento

Adicionalmente, fue necesario realizar un proceso administrativo para acceder a una licencia gratuita, la cual es otorgada por el desarrollador del software exclusivamente a estudiantes en época de tesis o con un pago adicional. Esta gestión permitió habilitar todas las funcionalidades del programa, incluyendo las herramientas de simulación avanzadas necesarias para el desarrollo y validación de este proyecto.

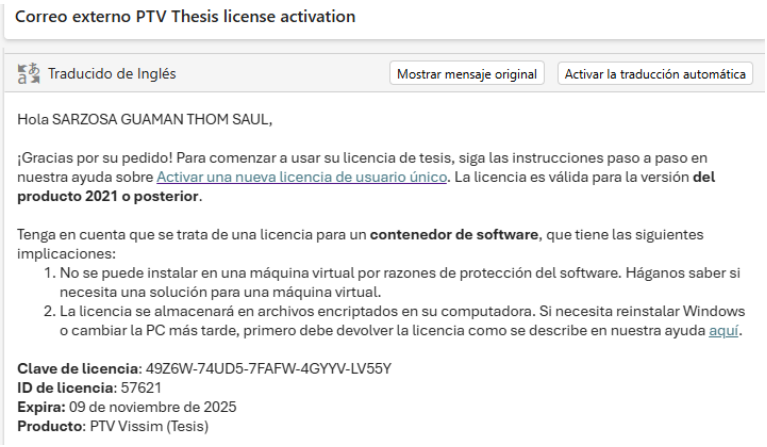


Figura 32. Proceso de seguimiento para licencia
(PTV Group, 2025)

Luego de haber logrado la licencia gratuita tuvo que hacer la correspondiente activación de la licencia para lo que hubo que realizar una serie de pasos:

1. Abrir la ventana Administrador de licencias PTV.
2. Copie la clave de licencia recibida por correo electrónico al portapapeles.
    a. Ejemplo: 49Z6W-74UD5-7FAFW-4GYYV-LV55Y
3. En la ventana Administración de licencias, hacer clic en el símbolo "Activar nueva licencia" e introducir la clave de la licencia. Confirme haciendo clic en OK.

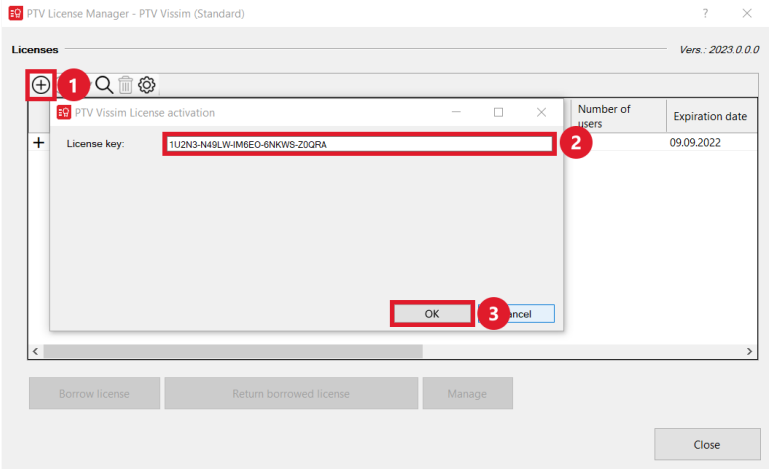


Figura 33. Pasos para activación
(PTV Group, 2025)

4. Seleccionar la opción En esta computadora Luego en Siguiente.

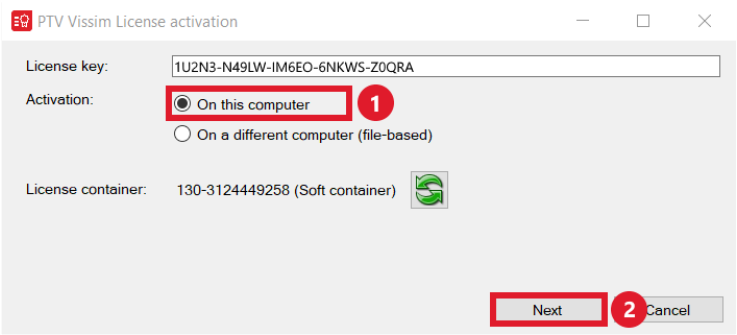


Figura 34. Selección para activación de cuenta
(PTV Group, 2025)

5. Espere a que se complete la activación y haga clic **en Cerrar.**

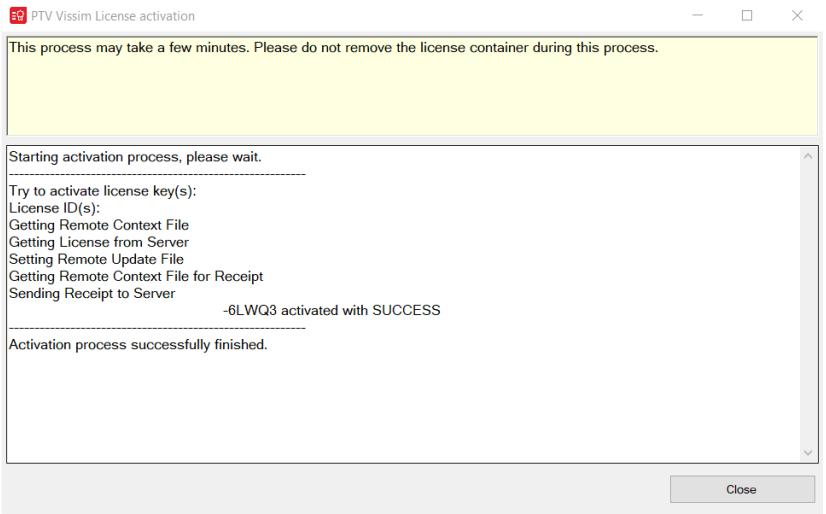


Figura 35. Licencia aprobada y activada para su uso
(PTV Group, 2025)

3.4.3.3 Verificación

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del software, se llevó a cabo un ejercicio preliminar en el cual se procedió a configurar un escenario de simulación representativo. En este proceso se incorporó de manera detallada la geometría de la intersección seleccionada, incluyendo la definición de las calles, carriles, accesos y salidas. Asimismo, se ingresaron los flujos vehiculares correspondientes, se establecieron los tipos de vehículos a simular y se programaron las fases semafóricas. Esta verificación permitió asegurar que el entorno virtual reflejara adecuadamente las condiciones reales del estudio, tal como se observa en la Figura 36

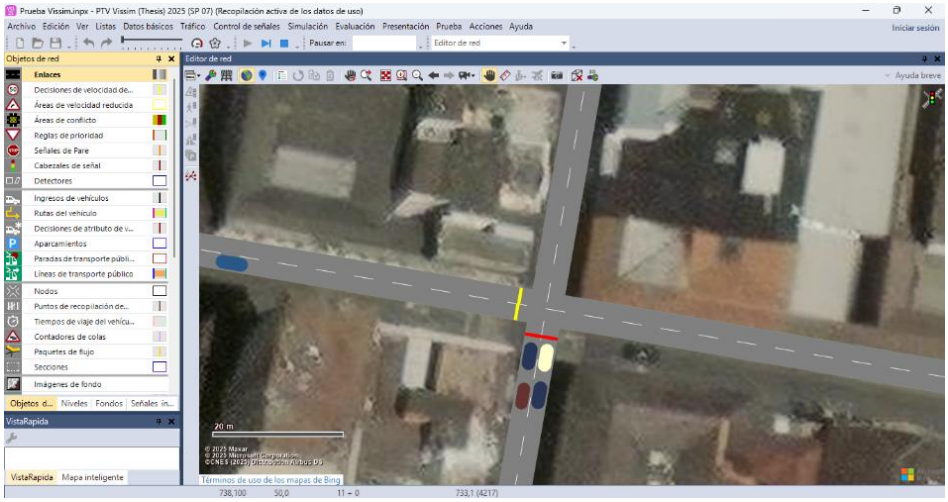


Figura 36. Ejercicio de Simulación en Vissim
(Autoría Propia)

3.5 Recolección de datos y campaña experimental

La recolección de datos se llevó a cabo mediante el uso de cámaras instaladas en la intersección, las cuales permitieron registrar de forma continua la dinámica vehicular durante periodos representativos. Dichos periodos fueron definidos con el propósito de identificar adecuadamente el comportamiento del flujo vehicular existente en la zona de estudio.

Los equipos fueron configurados con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, garantizando así una alta resolución temporal en las mediciones. Entre los parámetros capturados se incluyen el número de vehículos, el tipo y tamaño de estos, el tiempo de paso por la intersección, así como el número de placa, tal como se muestra en las Tablas 9, 10 y 11, correspondientes a diferentes días de recolección.

Finalmente, los datos obtenidos fueron almacenados y organizados en una base estructurada, con el fin de facilitar su posterior análisis.

Tabla 9. Datos Capturados el 21/04/2025

No.	Licencia NO	Tipo de vehículo	Tamaño	Tiempo
1	161G	Vehículo de tamaño pequeño	224	6:00:56
2	54	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:02:49
3	1BF7379	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:06:57

4	FF156	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:11:05
5	L1	Vehículo de tamaño pequeño	416	6:11:19
6	FD11839	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:11:55
7	GSB6891	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:12:11
8	1DD2243	Vehículo de tamaño pequeño	416	6:13:40
9	PZG813	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:14:14
10	IAA2224	Vehículo de tamaño pequeño	416	6:14:29

(Autoría Propia)

Tabla 10. Datos Capturados el 24/04/2025

No.	Licencia NO	Tipo de vehículo	Tamaño	Tiempo
1	G5494	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:00:18
2	IS0135	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:00:40
3	PC767	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:01:30
4	Sin placa	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:05:22
5	13	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:11:05
6	CCLC7	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:12:01
7	SY	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:13:34
8	1	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:15:35
9	F01189	Vehículo de tamaño pequeño	256	6:17:00
10	1B011	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:17:40

(Autoría Propia)

Tabla 11. Datos Capturados el 26/04/2025

No.	Licencia NO	Tipo de vehículo	Tamaño	Tiempo

1	70	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:03:13
2	Sin placa	Vehículo de tamaño pequeño	256	6:04:20
3	11611	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:05:45
4	14	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:05:55
5	LA414	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:06:59
6	CHN	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:08:02
7	Sin placa	Vehículo de tamaño pequeño	224	6:09:28
8	71144	Vehículo de tamaño pequeño	320	6:10:32
9	SO0GC6TI6	Vehículo de tamaño pequeño	288	6:11:16
10	112	Vehículo de tamaño pequeño	384	6:13:58

(Autoría Propia)

Se realizó una recolección de datos durante el transcurso de una semana con el objetivo de identificar las variaciones del flujo vehicular a lo largo del día. A partir de este análisis, se establecieron las franjas horarias de estudio, clasificándolas en horas pico y horas valle, en función de la intensidad del tráfico observada. Esta categorización permite una evaluación diferenciada del comportamiento vehicular y sus emisiones asociadas en distintos niveles de demanda.

Los horarios que pudimos establecer para nuestra investigación fueron los lunes, jueves y sábados en las horas de 11 a 12pm, 14 a 15pm, y de 17 a 18pm , esto debido a que se consideró horas en donde existan más afluencia de vehículos que se considera una hora pico, como es de 11 a 12 horas esto debido a que varios vehículos salen a las instituciones financieras alrededor de la intersección y además empiezan a dirigirse a las instituciones educativas a retirar a los estudiantes lo que genera que se desarrolle una congestión.

La hora de 14 a 15pm fueron considerado como horas valles ya que estos horarios la gente salen menos en sus vehículos, puesto que son horas de almuerzo y la gente se dirige solo caminando estos distintos recintos, sin embargo, en horario de 17 a 18 horas se considera una hora también de congestión ya que varias de estas personas salen a sus respectivos hogares de sus lugares de trabajo.

3.5.1 Clasificación vehicular

Adicionalmente, durante el proceso de recolección de datos se llevó a cabo una clasificación vehicular según el tipo de unidad observada: vehículos livianos, vehículos pesados y motocicletas como se muestra en la Figura 37. Esta categorización resulta fundamental para la posterior estimación de emisiones, ya que cada tipo de vehículo presenta factores de emisión y patrones de conducción diferenciados, los cuales inciden directamente en la precisión del modelado y en la representatividad de los resultados obtenidos.

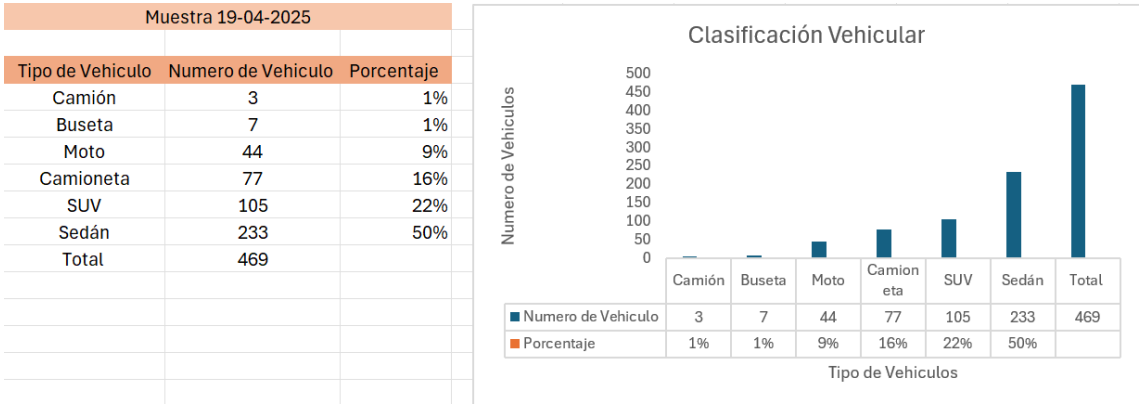


Figura 37. Clasificación Vehicular de la Calle Simón
(Autoría Propia)

Para el presente análisis se seleccionó una muestra representativa del total de datos recolectados, con el propósito de identificar los tipos predominantes de vehículos que circulan por la intersección en estudio. Esta muestra permitió observar que los vehículos tipo sedán constituyen la mayor proporción del flujo vehicular, lo cual se asocia a su uso frecuente en actividades cotidianas por parte de la población local. En segundo lugar, se registró una presencia significativa de vehículos tipo SUV, también vinculados a desplazamientos relacionados con actividades laborales y académicas. En menor proporción se encuentran las camionetas, lo que responde a la limitada actividad de carga en el sector. Finalmente, los camiones representan un porcentaje reducido dentro del flujo vehicular, debido a la escasa presencia de establecimientos que demanden procesos de distribución de productos.

3.6 Modelamiento y Estimación de Emisiones

Para llevar a cabo el modelamiento, se desarrolló un ejercicio preliminar utilizando como referencia un día típico de operación en la intersección seleccionada. Con el apoyo del software PTV VISSIM, se logró estimar de manera aproximada parámetros cinemáticos

como la velocidad y la aceleración, así como los niveles de emisiones generados en dicho entorno.

A continuación, se describe paso a paso el proceso seguido para el modelamiento. En primera instancia, se lleva a cabo la creación de la intersección, definiendo la geometría vial, el número de carriles, los accesos, las salidas y las características del entorno. En la segunda etapa, se incorporan los elementos complementarios como semáforos, señales, detectores y pasos peatonales, además de establecer la composición de la flota vehicular, considerando los tipos de vehículos y sus porcentajes de participación en el flujo.

Posteriormente, se configuran los parámetros operativos de la intersección junto con la temporización semafórica, determinando las fases, ciclos y tiempos de verde de acuerdo con la programación existente o la propuesta de control a evaluar. Finalmente, se procede a la ejecución de la simulación y a la extracción de resultados, los cuales permiten analizar el comportamiento del tráfico, las demoras promedio, los tiempos de viaje, las longitudes de cola y otros indicadores de desempeño relevantes para la investigación.

3.6.1 Creación de la intersección

Como primer paso, al abrir el programa se debe identificar en el mapa la ubicación de la intersección que se va a modelar, tomando como referencia un punto reconocible del lugar. En este caso, se localizó la ciudad de Ibarra mediante el buscador del software como se ve en la Figura 38. Y posterior a ello se identificó nuestra intersección relacionada con el estudio la cual se encuentra en las Calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo.

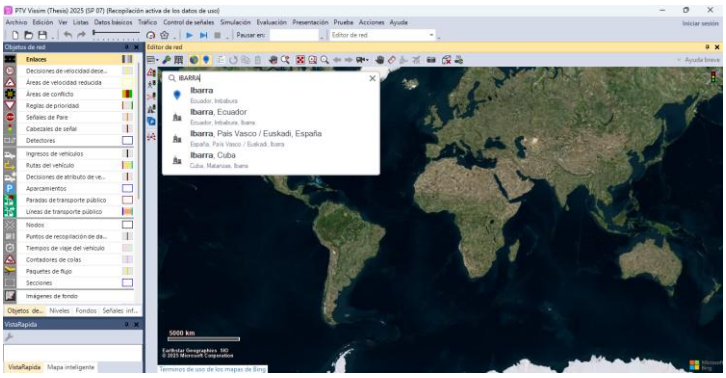


Figura 38. Identificación del lugar de estudio
(Autoría Propia)

Una vez identificada la intersección de estudio, se procedió a la creación de los enlaces, correspondientes al trazado de las vías que conforman la red vial. En esta etapa se definen las principales características geométricas de cada vía, tales como el ancho de calzada y el número de carriles asociados a cada aproximación. Para el presente estudio, se modelaron enlaces con una longitud aproximada de 50 m para cada una de las vías, tal como se ilustra en la Figura 39.



Figura 39. Trazado de enlaces en el Software
(Autoría Propia)

Adicionalmente, cada enlace fue debidamente etiquetado con su respectivo identificador, utilizando el nombre propio de las carreteras que conforman la intersección. En cuanto a las características geométricas, cada vía fue modelada con dos carriles de circulación, con un ancho de 2,50 m por carril, tal como se muestra en la Figura 40.

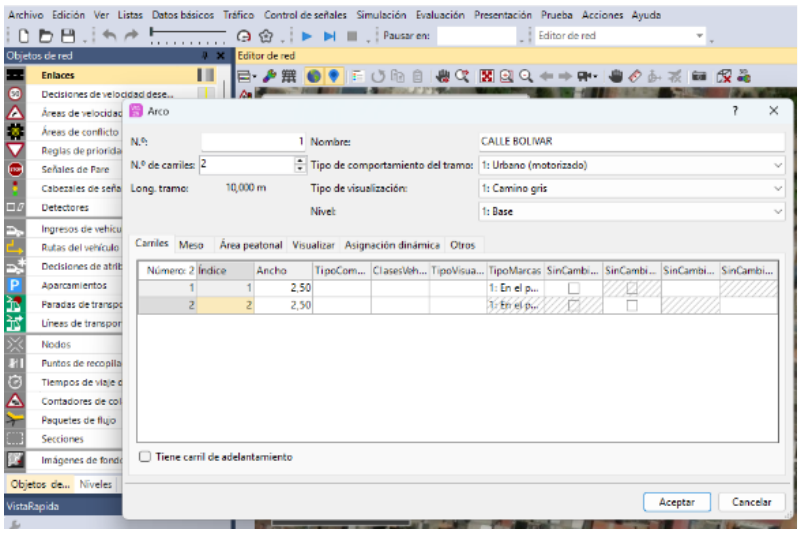


Figura 40. Etiquetado de vías y características geométricas en el Software
(Autoría Propia)

Posteriormente, en la Figura 41 se puede observar la zona de conflicto, la cual representa el punto de conexión entre las dos vías. En este punto, mediante la herramienta denominada zona de conflicto, es posible establecer la prioridad de paso para uno de los carriles, incluso antes de incorporar las señales de tráfico correspondientes, en nuestro caso se dio la prioridad se dio ag la calle Simón Bolívar puesto que es mayor el número de vehículos que pasan por la misma.



Figura 41. Zona de conflicto entre las dos vías
(Autoría Propia)

3.6.2 Incorporación Flota Vehicular y otros elementos

Una vez completada la intersección, se procedió a la implementación de la flota vehicular dentro del modelo de simulación. Para este proceso se utilizaron los datos obtenidos a partir de las cámaras de monitoreo instaladas en la intersección, los cuales permitieron identificar el volumen vehicular. En particular para este ejemplo se consideró registros correspondientes al lunes, en el intervalo horario de las 11:00 y las 12:00, obteniéndose un total de 470 vehículos para la calle Simón Bolívar 316 vehículos para la calle Miguel Oviedo, valores que fueron empleados como parámetros de entrada en la simulación.

En este proceso se incorporan parámetros como el tipo de vehículo, la velocidad promedio a la que circula cada categoría y el flujo relativo que representa la proporción de vehículos que transitan por cada una de las carreteras tal y como se muestra en la Figura 42. Cabe aclarar que, dentro de la composición vehicular, se emplean ciertas terminologías específicas para clasificar los tipos de vehículos. Por ejemplo, el término LGV (*Light Goods Vehicle*) hace referencia a aquellos vehículos destinados al transporte de mercancías cuya capacidad de carga no supera las 3.5 toneladas; en el caso de esta investigación, esta categoría corresponde a las camionetas. Por otro lado, la denominación

HGV (*Heavy Goods Vehicle*) se utiliza para los vehículos cuya capacidad de carga excede las 3.5 toneladas, siendo en este estudio representados por los camiones.

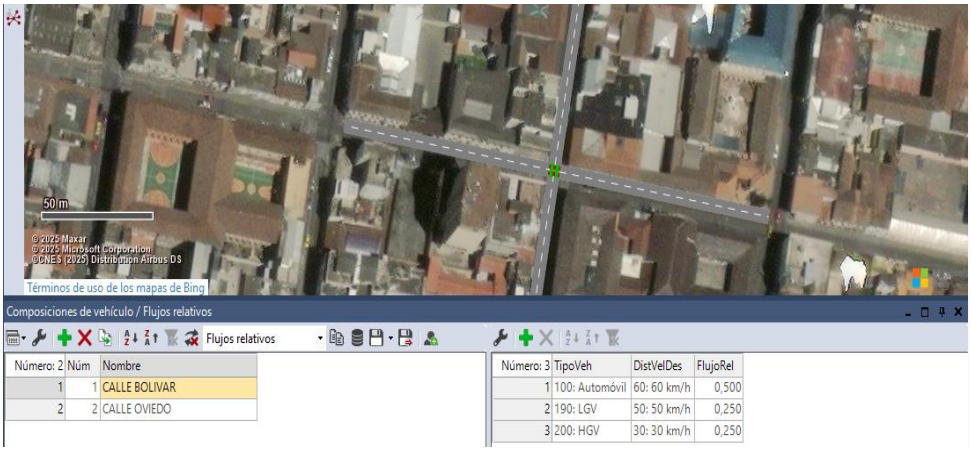


Figura 42. Implementación de Flota Vehicular en el Software
(Autoría Propia)

Una vez definida la composición de la flota vehicular, se procede a la implementación de los puntos de entrada y salida de los vehículos en cada una de las vías que conforman la intersección. En esta etapa también se establecen los volúmenes de tráfico, expresados en vehículos por hora, con el fin de representar de manera realista las condiciones observadas. Para el caso de esta investigación, dichos valores fueron obtenidos a partir del conteo vehicular registrado por las cámaras de monitoreo. Finalmente, se realiza una verificación del modelo para comprobar que todos los elementos configurados hasta este punto funcionen correctamente dentro del entorno de simulación como se muestra en la Figura 43.

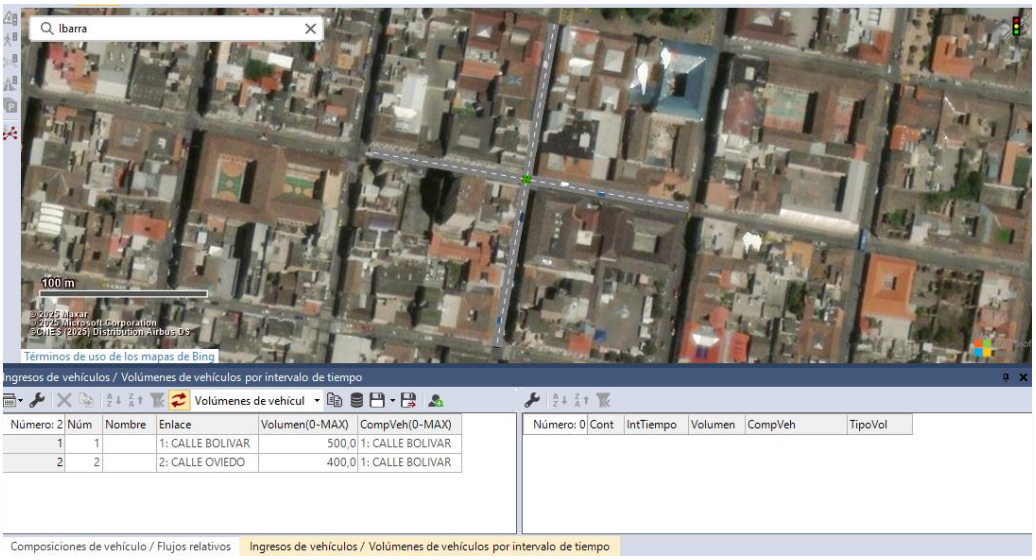


Figura 43. Simulación de la Flota Vehicular
(Autoría Propia)

3.6.3 Configuración de Señales Tráfico

En el caso de la presente investigación, se optó por la implementación de semáforos, dado que el enfoque principal se centra en el comportamiento vehicular más que en el flujo peatonal. Para esta configuración se definió un ciclo semafórico de 90 segundos para ambas vías como se puede observar en la Tabla 12, tomado como referencia el ciclo real de la intersección. El procedimiento se realizó accediendo al módulo de control de señales, donde se creó un semáforo independiente para cada una de las aproximaciones que conforman la intersección.

Tabla 12. Funcionamiento del semáforo de la intersección

Fase	Duración
Verde	41 seg.
Ámbar	4 seg.
Rojo	41 seg.

(Autoría Propia)

En este apartado se establecieron además los tiempos de duración de cada fase semafórica, los cuales se presentan en la Figura 44. Dichos tiempos fueron previamente analizados y pueden ser ajustados o modificados en función de los requerimientos específicos del modelo.

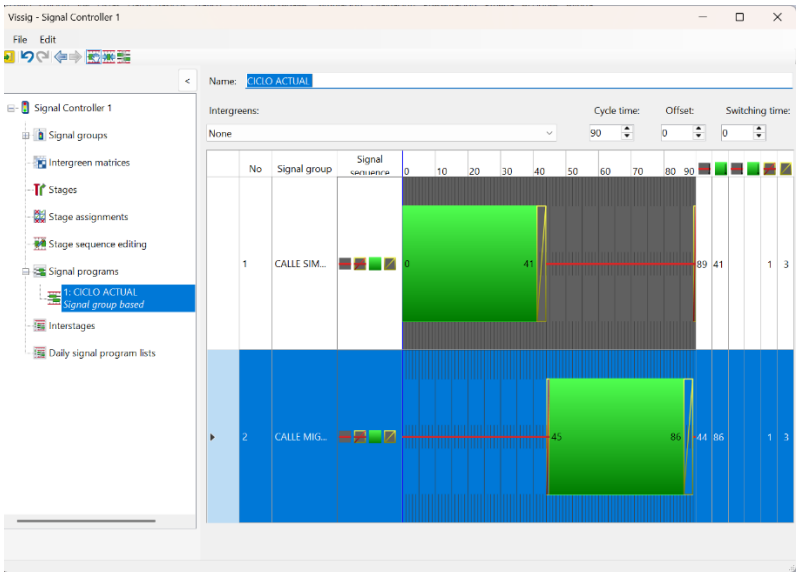


Figura 44. Configuración del tiempo de los semáforos
(Autoría Propia)

Posteriormente, al igual que en etapas anteriores, se ejecuta una simulación preliminar con el propósito de verificar el correcto funcionamiento del sistema semafórico de la Figura 45. En esta prueba se observa el cambio de luces entre las fases roja y verde, asegurando que el ciclo completo de señalización se desarrolle de manera adecuada dentro de la simulación.



Figura 45. Simulación del funcionamiento de las señales de tránsito (Software Vissim)

En la presente investigación se realizó el análisis correspondiente para determinar el ciclo óptimo de los semáforos en la intersección evaluada. Para ello, se consideraron diversos parámetros técnicos que permitieron establecer de manera adecuada el cálculo de los tiempos semafóricos y la distribución en cada fase.

3.6.3.1 Intervalo de cambio de fase

Se define como el intervalo de transición comprendido entre la fase intermedia y la fase de rojo total. Su función principal es advertir a los usuarios sobre el cambio en la prioridad de paso dentro de la intersección, permitiendo una evacuación en el área de conflicto antes de otorgar el derecho de al movimiento opuestos. Para su determinación, se emplea la siguiente expresión:

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{w+W+L}{v}\right)$$

Ecuación 6

Donde:

y = intervalo de cambio de fase

t = tiempo de reacción del conductor (suele ser 1s)

v = velocidad de aproximación

a = tasa de desaceleración (usualmente 3.05 m/s2)

w = ancho del cruce peatonal

W = ancho de la intersección al cruzar

L = longitud del vehículo (entre 4 y 5m)

$$y = \left(1s + \frac{9{,}72\ m/s}{2(3{,}05 m/s^2)}\right) + \left(\frac{3m + 6m + 5m}{9{,}72\ m/s}\right)$$

$$y = (2{,}59) + (1{,}44)$$

$$y = (4{,}03)$$

Al hacer una aproximación a número entero nos da un valor de 4s que es un valor usual para este tipo de intersecciones en zona urbana y que comparando con el valor real de 4s como se observa en la Tabla 12 es el valor adecuado.

3.6.3.2 Flujo de saturación y tiempo perdido

El flujo de saturación vehicular se define como la tasa máxima a la que los vehículos pueden atravesar una intersección durante el intervalo efectivo de luz verde, bajo condiciones ideales y cuando existe una cola suficientemente larga que garantiza una descarga continua de vehículos. Generalmente se expresa en vehículos por hora por carril (veh/h/carril) y es un parámetro fundamental para el análisis y diseño de intersecciones semaforizadas.

Durante el análisis se observó que el ciclo semafórico actualmente implementado no responde de manera óptima a las condiciones reales de operación de la intersección, evidenciándose demoras innecesarias y una distribución poco eficiente de los tiempos verdes. Por esta razón, en la presente investigación se consideró pertinente realizar una reevaluación del ciclo, apoyándose en la siguiente expresión matemática, la cual permite estimar un tiempo de ciclo más acorde con el volumen vehicular.

$$t_p = t_{arranque+}\, t_{despeje}$$

Ecuación 7

Donde:

Tp = Tiempo perdido por fase

Tarranque = Tiempo perdido en la salida de vehículos (usualmente 2s)

Tdespeje = tiempo de intercambio de fase.

$$t_{despeje} = (intercambio\ de\ fase) - tiempo\ aprovechado$$

Ecuación 8

$$t_{despeje} = (4s) - (2s)$$

$$t_{despeje} = 2s$$

$$t_p = t_{arranque+}\, t_{despeje}$$

$$t_p = 2s + 2s$$

$$t_p = 4s$$

En este caso como existen dos fases en la intersección, el tiempo perdido por las 2 fases es de L=8s

Por tanto, el tiempo efectivo del ciclo:

$$C - L = 90s - 8s$$

$$C - L = 82s$$

El análisis desarrollado se fundamenta en la evaluación del tiempo perdido correspondiente al ciclo semafórico actual. No obstante, para complementar la valoración operacional de la intersección, resulta necesario analizar el comportamiento del flujo bajo condiciones de saturación. En este sentido, se procede a evaluar el grado de saturación mediante la siguiente expresión, la cual permite determinar la relación entre la demanda vehicular y la capacidad disponible en cada fase.

Para calcular el grado de saturación pertinente se deben tomar en consideración los siguientes parámetros:

$$s = so(fw)(fHV)(fp)$$

Ecuación 9

Donde:

Ancho del Carril = 2,5m fw=0.85

Estacionamiento lateral fp = 0.80

Presencia de vehículos pesados (Buses o Trailers) = 0

Presencia de Camiones fhv = 0.95

Número de carriles = 2 hábiles y de estacionamiento

$$so=1900\ veh\ |h|carril$$

$$so=1900\ (0.85)\ (0.95)\ (0.80)$$

$$so=1227{,}4\ veh\ |h|carril$$

Llevando a una aproximación el flujo de saturación es de 1227 veh/h/carril, lo que nos da que por las dos fases tenemos 2454 veh/h. Con este valor ya definido podemos obtener el grado de saturación por cada lado de la intersección, valiéndonos de los valores aproximados que obtuvimos con el conteo de vehículos, lo que se define en la siguiente expresión:

Fase 1 q = 524 veh/h

Fase 2 q = 356 veh/h

$$yi = \frac{q_i}{s_i}$$

Ecuación 10

Donde:

yi = grado de saturación

qi = flujo critico

si = flujo de saturación

$$y_1 = \frac{524}{2454}$$

$$y_1 = 0.214$$

$$y_2 = \frac{356}{2454}$$

$$y_2 = 0.145$$

$$Y = 0.214 + 0.145$$

$$Y = 0.359$$

De esta manera podemos obtener cual sería el ciclo de verde para cada fase aplicando el Formula de F.V. Webster:

$$gi = \frac{yi}{Y}(C - L)$$

Ecuación 11

Fase 1 $gi = \frac{0.214}{0.359}(80)$

$$gi = 51s$$

Fase 2 $gi = \frac{0.145}{0.359}(80)$

$$gi = 35s$$

Considerando carriles de 2.5 m de ancho, presencia de estacionamiento lateral fuerte y participación moderada de vehículos pesados, el flujo de saturación ajustado fue de 1227 veh/h por carril, equivalente a 2454 veh/h por fase. Con volúmenes críticos de 524 veh/h y 356 veh/h para las fases 1 y 2 respectivamente, los grados de saturación obtenidos fueron 0.214 y 0.135, con una sumatoria Y = 0.268.

Para un ciclo fijo de 94 s y un tiempo perdido total de 8s, el tiempo verde efectivo disponible fue de 86 s. Aplicando el método de Webster, el reparto del verde resultó en 51 s para la fase 1 y 35 s para la fase 2, manteniendo proporcionalidad con la demanda vehicular observada y garantizando un funcionamiento operacional adecuado de la intersección.

3.6.3.3 Ciclo optimo de semaforización

En base con los datos obtenidos, podemos definir un ciclo optimo de funcionamiento para los ciclos semafóricos. Esto lo podemos realizar bajo el mismo principio F.V. Webster con la siguiente expresión:

$$Co = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} Y_i}$$

Ecuación 12

Donde:

Co = Tiempo optimo de ciclo (s)

L= Tiempo total perdido por el ciclo (s)

Yi = Máximo valor entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril critico de la fase I

φ = Número de fases

$$Co = \frac{1.5\ (8) + 5}{1 - 0.359}$$

$$Co = \frac{17}{0.641}$$

$$Co = \ 26.52\ s$$

Aplicando el principio de Webster y considerando que el tiempo perdido total es de 8 s y una sumatoria de grados de saturación Y = 0.359, se obtuvo un ciclo óptimo teórico de 30s con aproximación. Este valor es significativamente menor al ciclo implementado de 90 s, lo que indica que la intersección opera con niveles de saturación bajos y que el ciclo actual podría estar sobredimensionado respecto a la demanda vehicular observada.

3.6.4 Simulación Cinemática Vehicular y Emisiones

Como parte final del proceso, para realizar la simulación y la posterior extracción de resultados, se deben definir los parámetros principales requeridos en la investigación. Entre ellos, es necesario establecer el tiempo total de simulación, que en este caso corresponde a una hora (3600 segundos), así como la hora de inicio y la fecha de ejecución de esta.

Adicionalmente, se debe configurar la evaluación de los elementos del modelo, de acuerdo con los procedimientos desarrollados previamente. En esta investigación, los aspectos evaluados incluyen los enlaces creados, el ingreso de los vehículos y el rendimiento operativo de los mismos. En este punto, se recomienda definir un tiempo inicial de simulación comprendido entre 800 y 900 segundos, con el propósito de evitar que el proceso inicie con la red completamente vacía, garantizando así resultados más representativos. Esta configuración se puede observar en la Figura 4z

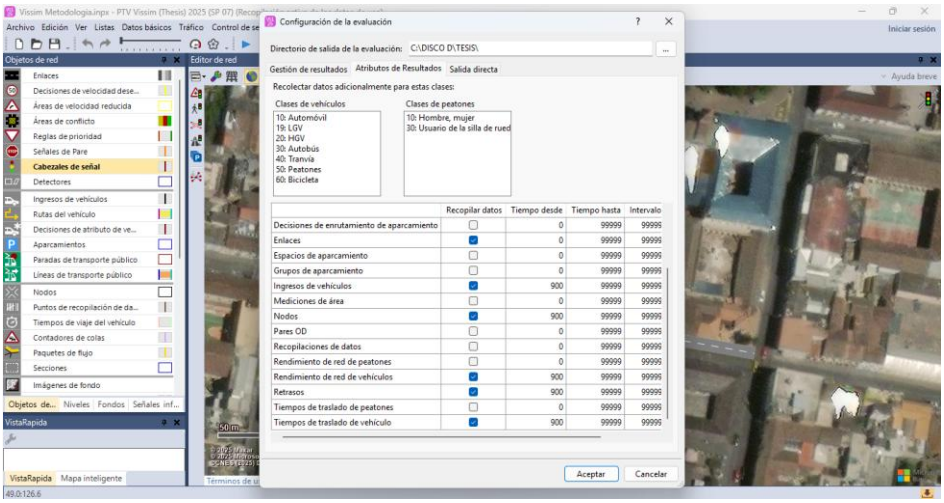


Figura 46. Configuración de Parámetros para a la simulación en el Software
(Autoría Propia)

Antes de proceder con la simulación, es necesario crear los nodos dentro del modelo. En el contexto de la simulación, un nodo se define como el punto específico de la intersección que se desea evaluar. La creación de estos nodos permite que los criterios de análisis y medición se concentren exclusivamente en dicho punto, convirtiéndose en un paso fundamental dentro del proceso de configuración del modelo. Para su creación, se debe utilizar la herramienta llamada nodo y establecer la ubicación del nodo en el área de estudio, tal como se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Creación de nodos en el Software
(Autoría Propia)

Finalmente, para concluir el proceso, se procede a ejecutar la simulación con una duración de una hora, ya que esto fue lo establecido por cada franja de nuestra investigación. En esta etapa, es necesario seleccionar, dentro del apartado de evaluación, el conjunto de resultados que se desea visualizar, lo que permite obtener los primeros valores cuantitativos generados por el modelo. En el caso de los datos cinemáticos, es posible

obtener variables como la posición, la velocidad, la velocidad deseada y la aceleración, tal como se muestra en la Figura 48.

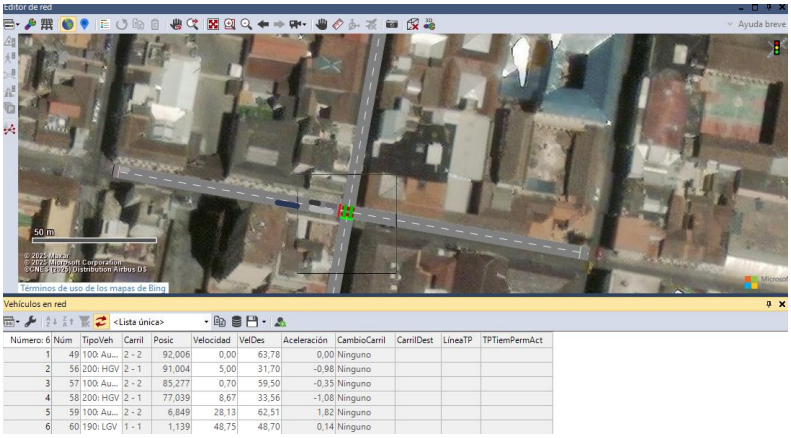


Figura 48. Obtención de Datos Cinemáticos
(Autoría Propia)

Por su parte, en la Figura 49 se presentan los resultados relacionados con las emisiones, entre los que se incluyen el monóxido de carbono CO, los compuestos orgánicos volátiles y el consumo de combustible. Estos resultados iniciales constituyen la base para el análisis posterior del comportamiento vehicular en la intersección modelada.

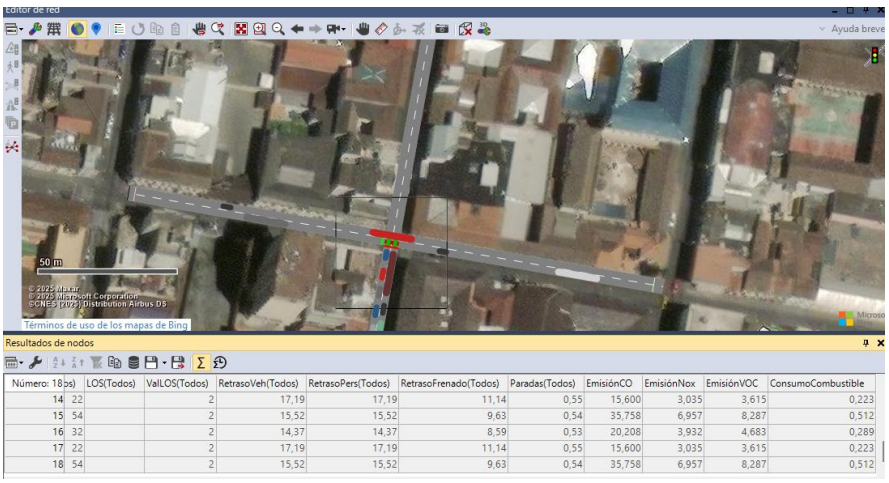


Figura 49. Obtención de Datos de Emisiones
(Autoría Propia)

3.6.5 Extracción de Datos

Para la obtención de los datos, una vez finalizada la simulación, se procede a seleccionar el botón guardar, tal como se muestra en la Figura 50, lo que permite la exportación de las variables disponibles. Dentro del campo cinemático se pueden obtener parámetros como la aceleración, la velocidad y la posición. Por otro lado, en el campo de emisiones es posible extraer valores de CO, NOx, VOC y consumo de combustible. Sin embargo,

en el caso de la presente investigación únicamente se evaluarán los NOx y el consumo de combustible. Este procedimiento se realiza de manera individual para cada evaluación de resultados, en función de las variables y del tipo de análisis requeridos dentro del estudio.

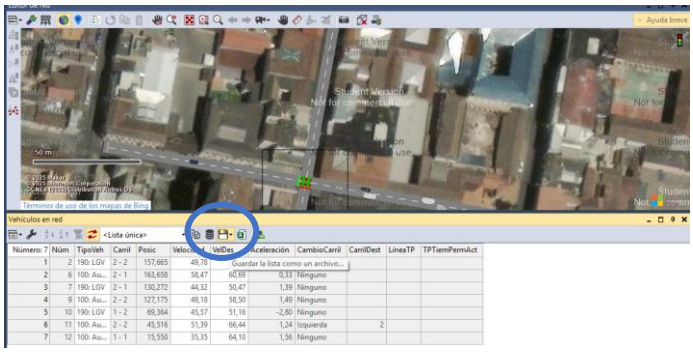
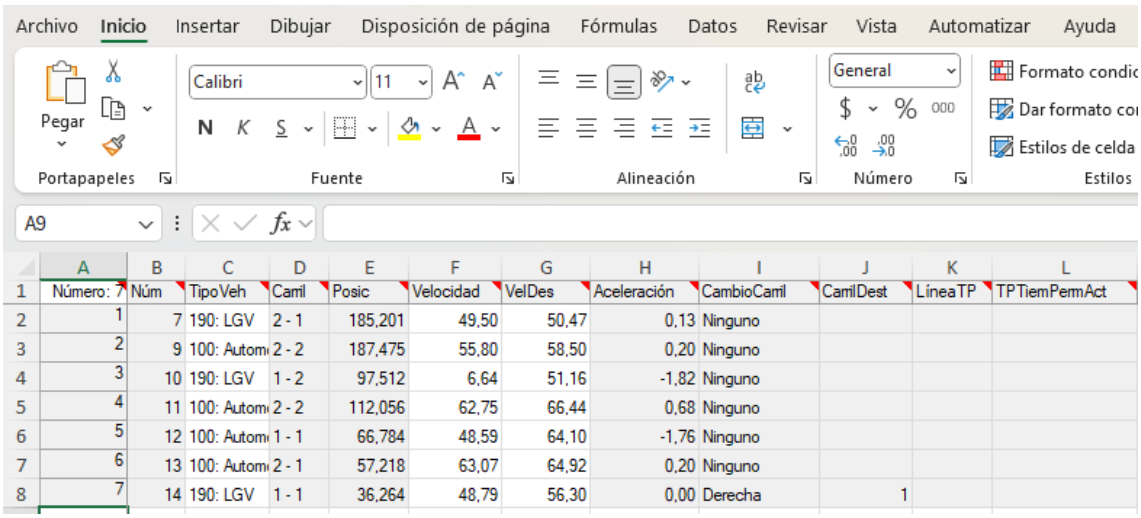


Figura 50. Extracción de datos en diferentes formatos
(Autoría Propia)

Finalmente, al momento de exportar los datos, estos quedan disponibles y listos para ser procesados en el formato que se requiera. En el caso de la presente investigación, los resultados fueron exportados en formato CSV, debido a su compatibilidad con Excel, lo que permitió la obtención de los valores necesarios para posteriormente calcular los resultados y realizar el respectivo análisis como se muestra en la Figura 51.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Número: 7	Núm	TipoVeh	Camil	Posic	Velocidad	VelDes	Aceleración	CambioCamil	CamilDest	LíneaTP	TPTiemPermAct
2	1	7	190: LGV	2 - 1	185,201	49,50	50,47	0,13	Ninguno			
3	2	9	100: Autom	2 - 2	187,475	55,80	58,50	0,20	Ninguno			
4	3	10	190: LGV	1 - 2	97,512	6,64	51,16	-1,82	Ninguno			
5	4	11	100: Autom	2 - 2	112,056	62,75	66,44	0,68	Ninguno			
6	5	12	100: Autom	1 - 1	66,784	48,59	64,10	-1,76	Ninguno			
7	6	13	100: Autom	2 - 1	57,218	63,07	64,92	0,20	Ninguno			
8	7	14	190: LGV	1 - 1	36,264	48,79	56,30	0,00	Derecha	1		

Figura 51. Datos Extraídos en formato CVS
(Autoría Propia)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, junto con su respectivo análisis y discusión. En primer lugar, se expone una visión general de la composición del tráfico vehicular observado en la intersección, considerando todos los escenarios evaluados en el estudio. En segundo lugar, se analiza el comportamiento de los vehículos en relación con sus trayectorias, detallando los principales parámetros cinemáticos que influyen durante las fases de ralentí, aceleración y desaceleración. Posteriormente, se desarrolla un análisis de las emisiones generadas en función del comportamiento vehicular al atravesar la intersección. Finalmente, se comparan los distintos escenarios simulados con la situación real, evaluando las variaciones en el flujo vehicular y su incidencia en las condiciones operativas de la intersección.

Además, se presentan los resultados obtenidos con la simulación que permitió replicar con alto grado de detalle las condiciones reales del tráfico, integrando elementos como la geometría de la intersección, la configuración del sistema semafórico y las características del flujo vehicular observadas durante la campaña de recolección de datos en campo.

4.1 Caracterización de la Intersección

La intersección en las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo analizada está compuesta por el conjunto de vehículos que transitan por ella en los diferentes escenarios establecidos. Este análisis considera tanto el volumen total de vehículos como los distintos giros que estos realizan, dado que no todos mantienen una trayectoria en línea recta. Además, se incluyen dentro del estudio los semáforos ubicados en la intersección, los cuales poseen tiempos específicos de operación que influyen directamente en el flujo vehicular. A partir de estos elementos, se presenta a continuación, un análisis detallado de cada uno de los aspectos que intervienen en el comportamiento del tráfico dentro de la intersección.

4.1.1 Composición Vehicular

Para la comparación de la composición vehicular se emplearon dos métodos de levantamiento de información: el registro mediante cámaras de monitoreo y el conteo manual realizado en campo. Se analizaron un total de 18 muestras de los días 19-22-24 de abril del 2025, distribuidas equitativamente en ambos métodos, correspondiendo nueve

muestras a cada carretera estudiada. Esta distribución permitió contrastar los resultados obtenidos por cada técnica de registro, evaluar su consistencia y analizar posibles variaciones en la caracterización del flujo vehicular.

Esta doble metodología permitió obtener un análisis más completo y preciso del tipo de vehículos que transitan por la intersección, considerando que las cámaras únicamente registran el peso aproximado del vehículo, sin identificar su categoría específica. Los resultados de esta comparación se expresan tanto en porcentaje como en vehículos por hora, lo que permite evaluar de manera más detallada la distribución y frecuencia de cada tipo de vehículo dentro del flujo total de tráfico en la intersección estudiada.

En las Figura 52 se presenta la composición de la flota vehicular registrada en la intersección durante el lunes, considerando las tres franjas horarios analizadas correspondientes a la calle Simón Bolívar. Se evidencia que en todos los casos predominan los vehículos tipo sedán, los cuales representan cerca del 50 % del total del flujo vehicular. Este comportamiento sugiere que el tránsito en la intersección está conformado principalmente por vehículos livianos de uso particular, lo que puede asociarse a desplazamientos cotidianos hacia actividades laborales o domésticas. En segundo lugar, se ubican los SUV, con una participación aproximada del 25 %, mientras que el porcentaje restante como es el 15% se encuentra relacionado a motocicletas, y el ultimo 10% se encuentra distribuido entre busetas y camiones y camionetas, cuya menor presencia refleja una baja participación del transporte público y de carga durante este periodo de observación.

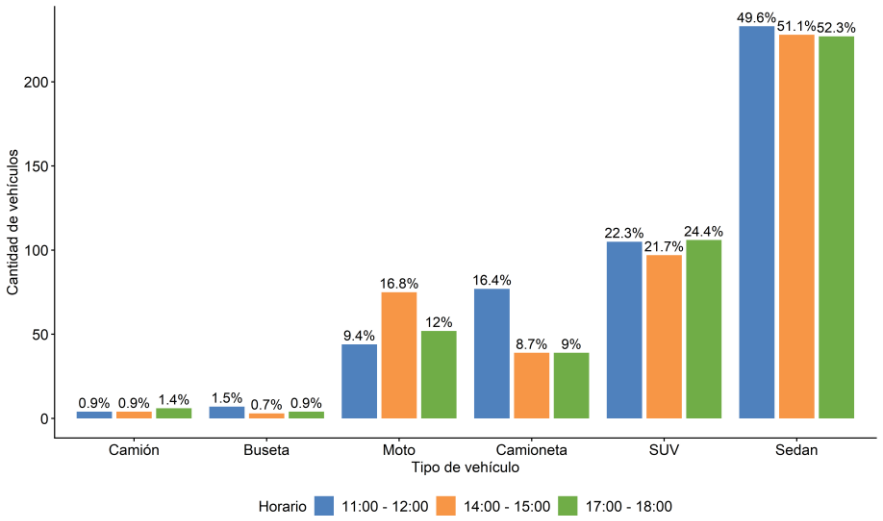


Figura 52. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Lunes. (Autoría Propia)

De manera similar, este análisis se realizó para la calle Miguel Oviedo durante el lunes. En este caso, se evidencia que el nivel de flujo vehicular es menor en comparación con la calle Simón Bolívar, lo cual resulta coherente al tratarse de una vía transversal y no una vía principal. No obstante, la diferencia en el número total de vehículos no es significativa. Al igual que en la vía principal, los vehículos tipo sedan de igual manera represan el 50% del total de todos los vehículos, seguidos con un 25% de los vehículos tipo SUV, sin embargo, en esta calle podemos observar que hay un porcentaje representativo del 15% en lo que es camionetas y motos y el otro 10% se encuentra distribuido por busetas, camiones.

En las Figura 53 se presenta la afluencia vehicular correspondiente a los escenarios analizados. De acuerdo con lo descrito previamente, se observa que el mayor flujo de vehículos se concentra en el horario de 17:00 a 18:00. Esto se debe a que, durante este periodo, la calle principal suele presentar un elevado nivel de congestión, lo que motiva a varios usuarios a emplear la vía alterna como ruta opcional para reducir tiempos de desplazamiento.

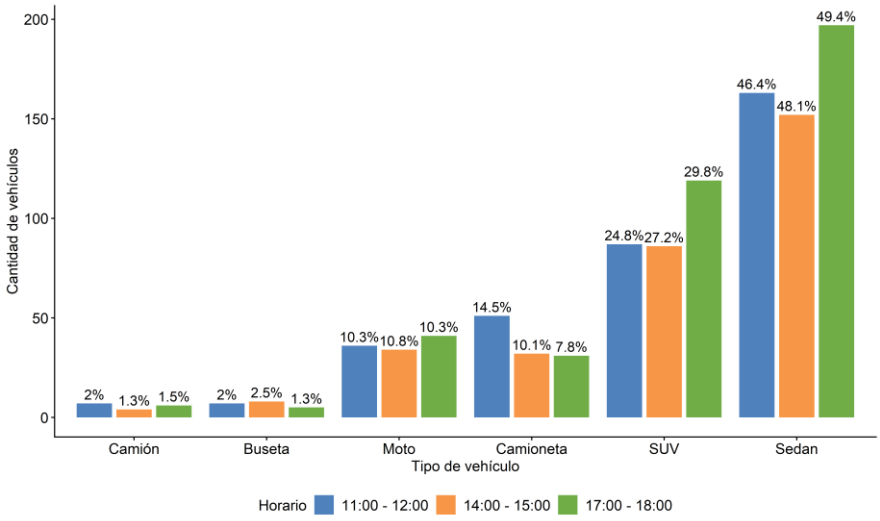


Figura 53. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Lunes (Autoría Propia)

En las Figura 54, se presenta la composición vehicular registrada en la intersección durante el jueves, considerando los tres escenarios correspondientes a la calle Simón Bolívar. Los resultados evidencian una tendencia similar a la observada en otros días de análisis, destacándose los vehículos tipo sedán como la categoría predominante, con una participación cercana al 50 % del total. Este comportamiento sugiere que la intersección

es utilizada mayoritariamente por vehículos livianos asociados a desplazamientos cotidianos.

En segundo lugar, se ubican los SUV, que representan aproximadamente el 25 % del flujo vehicular, manteniendo su relevancia dentro de la movilidad particular. Por su parte, las motocicletas aportan alrededor del 15 %, mientras que el 10 % restante corresponde a busetas, camiones y camionetas. La reducida proporción de estas últimas categorías confirma la limitada participación del transporte público y del transporte de carga durante el periodo de observación.

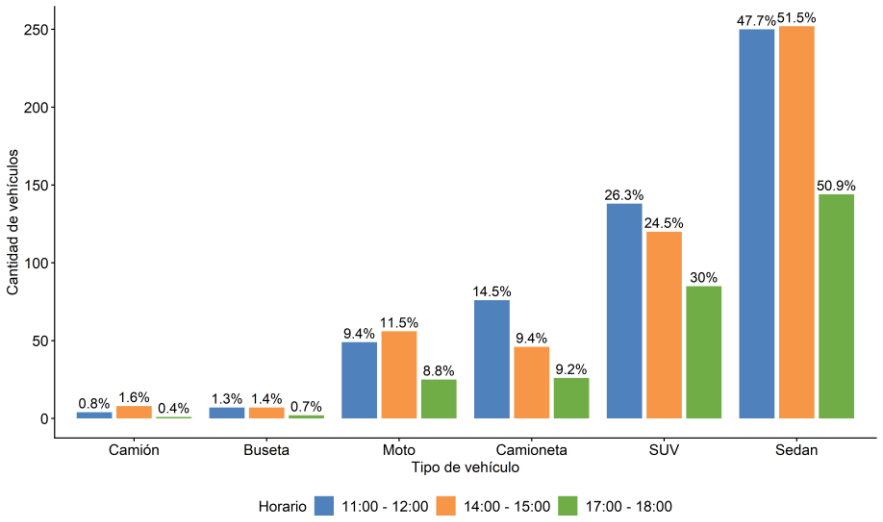


Figura 54. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Jueves (Autoría Propia)

De manera similar, se realizó el análisis correspondiente para la calle Miguel Oviedo durante el jueves. En este caso, se observa que el flujo vehicular es inferior al registrado en la calle Simón Bolívar, lo cual resulta consistente al tratarse de una vía transversal y no de una arteria principal. A pesar de ello, la diferencia en el número total de vehículos no es considerable. La composición vehicular mantiene una distribución semejante: los automóviles tipo sedán representan alrededor del 50 % del total, seguidos por los SUV con aproximadamente un 25 %. Sin embargo, en esta vía se identifica una participación más notable de camionetas y motocicletas, que en conjunto alcanzan cerca del 15 %, mientras que el 10 % restante corresponde a busetas y camiones, cuya presencia sigue siendo limitada.

Por otro lado, en las Figura 55 se muestra la afluencia vehicular para los diferentes escenarios evaluados. Los resultados permiten identificar que el mayor volumen de tránsito ocurre entre las 17:00 y las 18:00, periodo en el cual la calle principal suele experimentar altos niveles de congestión. Esta situación induce a numerosos conductores

optar por la calle alterna como una ruta alternativa para disminuir su tiempo de desplazamiento llegando a que el número sea de 423 vehículos.

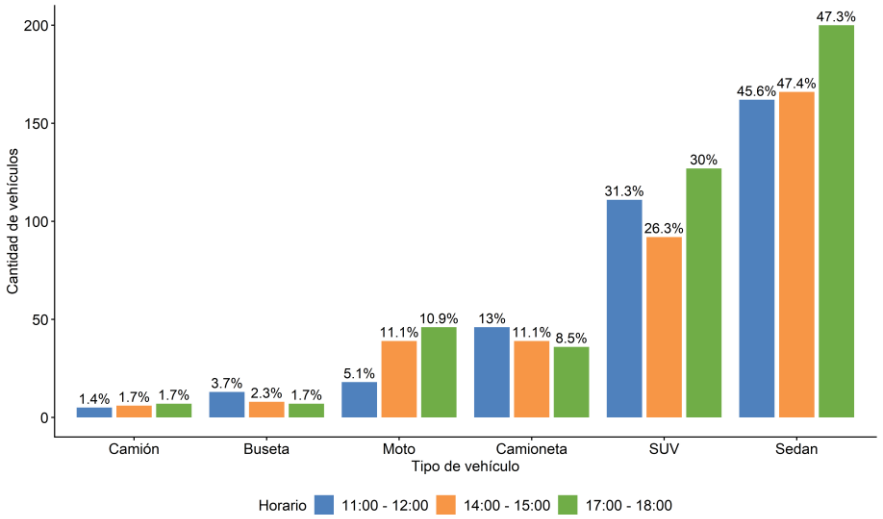


Figura 55. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Jueves (Autoría Propia)

Tomando como referencia los dos días anteriores correspondientes a días laborables se un segundo escenario enfocado en el comportamiento del tráfico durante los fines de semana, los cuales también pueden clasificarse como días valle debido a la ligera disminución en el flujo vehicular. Tal como se observa en las Figura 56, en las franjas horarias de 11:00 a 12:00 y de 14:00 a 15:00 se registra una reducción aproximada del 15% en comparación con los días entre semana, alcanzando una media de circulación de 340 vehículos.

No obstante, durante el horario de 17:00 a 18:00 se evidencia un incremento en el flujo vehicular. Este comportamiento es comprensible, dado que muchas personas aprovechan este periodo para desplazarse hacia el centro de la ciudad con fines recreativos luego de concluir sus actividades cotidianas. De igual manera, la composición vehicular presenta una distribución porcentual consistente entre los diferentes escenarios analizados. Los vehículos tipo sedán representan aproximadamente el 50% del total, mientras que los SUV conforman alrededor del 25%. El 25% restante se distribuye entre las demás categorías vehiculares registradas.

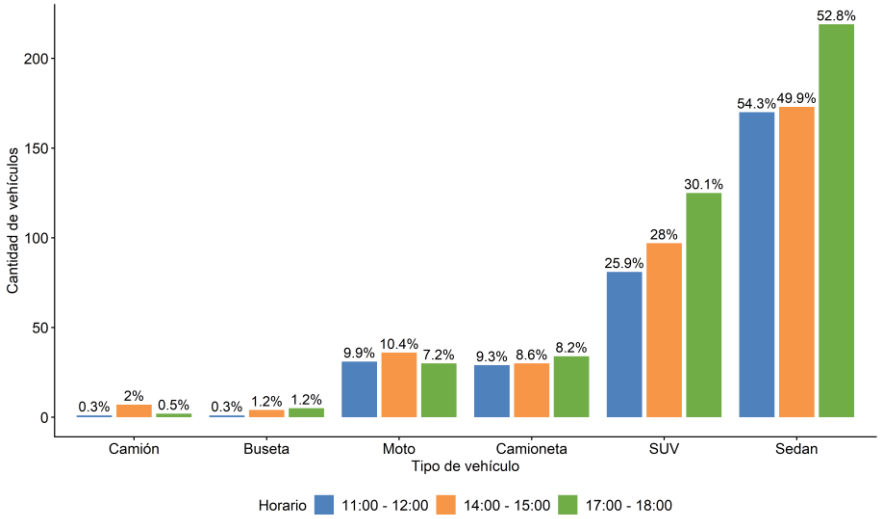


Figura 56. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Bolivar: Sábado (Autoría Propia)

En el caso de la calle Miguel Oviedo, se observa en las Figura 57 un comportamiento muy similar al registrado en la calle Simón Bolívar. Durante los fines de semana, las variaciones en el flujo vehicular muestran patrones comparables en ambas vías, lo que evidencia que la intersección mantiene una dinámica de tráfico relativamente estable en este tipo de días.

En particular, se aprecia que las horas de mayor y menor circulación coinciden entre ambas calles, lo cual indica que las actividades desarrolladas en la zona influyen de manera uniforme sobre el volumen vehicular general, el comportamiento observado respalda la clasificación del fin de semana como un día valle dentro del análisis de la intersección, dado el flujo vehicular no alcanza niveles elevados y se mantiene dentro de rangos moderados.

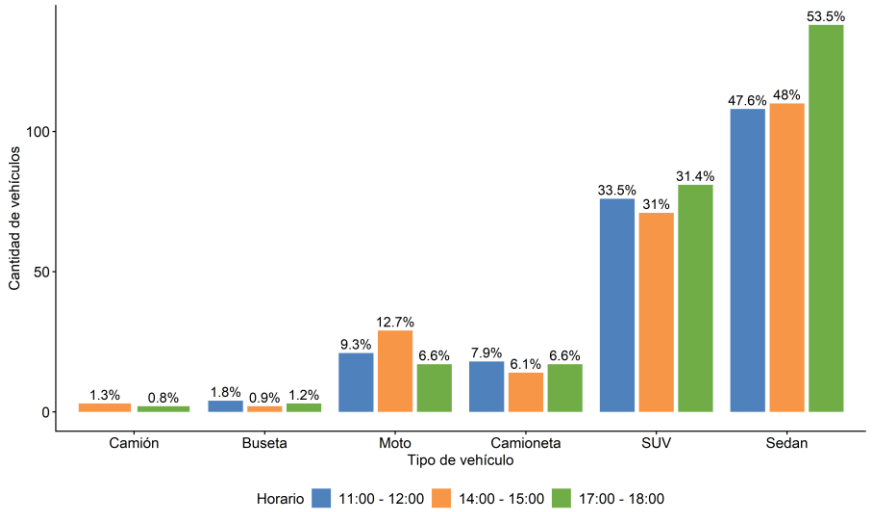


Figura 57. Flujo Vehicular por Tipo de Vehículos y Horario calle Oviedo: Sábado (Autoría Propia)

Además, En la Tabla 13 se presentan los resultados consolidados correspondientes a las 18 muestras analizadas, de las cuales nueve fueron registradas en la calle Simón Bolívar nueve en la calle Miguel Oviedo y al final un balance total de cuanto sumas por franja horaria. A partir de estos datos, se identificó y selecciono las muestras las cuales serán evaluadas en la presente investigación, permitiendo así un análisis comparativo entre ambas vías.

Tabla 13. Número de Vehículos con su respectiva calle y horario

Flujo Vehicular				
Dia	**Calle**	**11:00 – 12:00**	**14:00 – 15:00**	**17:00 – 18:00**
Lunes	Bolívar	471	446	435
	Oviedo	351	316	399
	Total	**822**	**762**	**834**
Jueves	Bolívar	524	489	283
	Oviedo	356	351	423
	Total	**880**	**840**	**706**
Sábado	Bolívar	313	347	416
	Oviedo	252	227	258
	Total	**565**	**574**	**674**

4.1.2 Giros y Direcciones

En esta sección se presentan los datos correspondientes a las trayectorias vehiculares observadas en los distintos horarios establecidos tanto en las calles Simón Bolívar como Miguel Oviedo. Se expone el total de vehículos que circularon por cada vía, así como la distribución de sus maniobras, es decir, si continuaron de forma recta o realizaron giros. Estas trayectorias están estrechamente relacionadas con las actividades planificadas por los usuarios, lo que influye en la elección de sus rutas y patrones de movimiento.

4.1.2.1 Lunes

En la Tabla 15 se presentan las trayectorias vehiculares correspondientes a cada uno de los escenarios evaluados para el lunes. En el primer escenario, se observó que, si bien la mayoría de los vehículos siguieron una trayectoria recta, fue también el escenario en el que se registró el mayor número de giros. Esta situación podría estar relacionada con la presencia de diversas entidades públicas en los alrededores, a las cuales muchas personas se dirigen durante dicho horario. Por otro lado, en el segundo y tercer escenario, se evidenció una tendencia predominante hacia trayectorias rectas, lo cual puede explicarse

por el hecho de que, durante esos periodos, varios establecimientos comerciales e instituciones educativas se encuentran en horarios de descanso o permanecen cerrados.

Tabla 14. Trayectoria Dia Lunes

Calle	Horario	Volumen Total (veh)	Línea Recta (veh)	Línea Recta (%)	Giros (veh)	Giros (%)
Bolívar	11:00 - 12:00	471	381	80.90%	90	19.10%
	14:00 - 15:00	446	394	88.34%	52	11.66%
	17:00 - 18:00	435	375	86.21%	60	13.79%
Oviedo	11:00 - 12:00	351	270	76.99%	81	23.01%
	14:00 - 15:00	316	247	78.23%	69	21.77%
	17:00 - 18:00	399	315	79.00%	84	21.00%

(Autoría Propia)

4.1.2.2. Jueves

A continuación, en la Tabla 16 se presentan las trayectorias vehiculares observadas durante el jueves. Tal como se había evidenciado previamente, en el primer escenario (de 11:00 a 12:00 horas) se registró la mayor cantidad de vehículos, destacándose que 439 de ellos mantuvieron una trayectoria en línea recta. En este mismo horario, la calle Oviedo también presentó una proporción considerable de giros, lo que podría estar asociado al inicio de actividades comerciales y administrativas en los alrededores. En el segundo escenario (de 14:00 a 15:00 horas), el flujo vehicular se mantiene elevado, aunque se observa una marcada preferencia por trayectorias rectas, reflejando desplazamientos más directos posiblemente vinculados con traslados intermedios o retorno a actividades. Finalmente, durante el tercer escenario, en la calle Oviedo alcanzó una de las proporciones más altas de trayectorias rectas del día, lo que sugiere un patrón de desplazamiento más directo hacia zonas residenciales o rutas de salida, buscando eficiencia en los tiempos de llegada.

Tabla 15. Trayectoria Dia Jueves

Calle	Horario	Volumen Total (veh)	Línea Recta (veh)	Línea Recta (%)	Giros (veh)	Giros (%)
Bolívar	11:00 - 12:00	524	439	83.81%	85	16.19%
	14:00 - 15:00	489	406	83.07%	83	16.93%
	17:00 - 18:00	283	220	77.82%	63	22.18%
Oviedo	11:00 - 12:00	357	261	73.11%	96	26.89%
	14:00 - 15:00	351	270	76.99%	81	23.01%
	17:00 - 18:00	423	322	76.18%	101	23.82%

(Autoría Propia)

4.1.2.3 Sábado

En la Tabla 17 se presentan las trayectorias vehiculares correspondientes al sábado. Durante el primer escenario (de 11:00 a 12:00), se registró un flujo moderado en ambas calles, con una clara preferencia por las trayectorias rectas, especialmente en la calle Bolívar, donde 265 de los 314 vehículos continuaron su trayecto sin giros. En el segundo escenario (de 14:00 a 15:00), se mantiene este comportamiento, con un predominio de trayectorias rectas, aunque se observa un ligero incremento en los giros en la calle Oviedo, posiblemente debido a desplazamientos hacia zonas comerciales o de ocio. Finalmente, en el horario de mayor actividad (de 17:00 a 18:00), el flujo vehicular se incrementa notablemente, sobre todo en la calle Bolívar, con 417 vehículos registrados, de los cuales 348 continuaron en línea recta. Este patrón sugiere una mayor movilidad en la tarde del sábado, relacionada con actividades de retorno a los hogares o desplazamientos hacia destinos recreativos.

Tabla 16. Trayectoria Dia Sábado

Calle	Horario	Volumen Total (veh)	Línea Recta (veh)	Línea Recta (%)	Giros (veh	Giros (%)
Bolívar	11:00 - 12:00	314	265	84.39%	49	15.61%
	14:00 - 15:00	348	313	89.94%	35	10.06%
	17:00 - 18:00	417	348	83.45%	69	16.55%
Oviedo	11:00 - 12:00	232	201	86.64%	31	13.36%
	14:00 - 15:00	227	182	80.18%	45	19.92%
	17:00 - 18:00	258	205	79.46%	53	20.54%

(Autoría Propia)

4.1.3 Configuración del Semáforo

A partir del análisis del comportamiento vehicular registrado en los distintos escenarios evaluados tanto en días laborables como en fines de semana fue posible examinar el plan semafórico actualmente implementado en la intersección. Dicho sistema opera con una configuración fija compuesta por 42 segundos de luz verde, 3 segundos de luz ámbar y42 segundos de luz roja para cada aproximación como se observa en la Tabla 18, tiempos establecidos originalmente para atender condiciones de alta demanda vehicular.

Tabla 17. Tiempos del ciclo semafórico en la intersección

Fase semafórica	Tiempo (s)	Participación en el ciclo (%)
Luz verde	42	48,2 %
Luz ámbar	4	3,6%
Luz roja	42	48,2 %
Tiempo total del ciclo	87	100 %

(Autoría Propia)

Los resultados evidencian que aproximadamente el 96,56 % del tiempo del ciclo se concentra en las fases de detención y habilitación del flujo vehicular, lo cual refleja en condiciones de alta demanda. Sin embargo, al contrastar estos tiempos con los patrones reales de circulación, se observa que dicha configuración no responder de manera eficiente a las variaciones de demanda vehicular para los fines de semana.

Bajo estas condiciones, mantener los 42 segundos de verde y de rojo se vuelve innecesario y genera tiempos de espera prolongados en la aproximación que permanece estática, disminuyendo la eficiencia operativa del sistema semafórico y complicando las condiciones del vehículo y la producción de emisiones de este. Estos resultados sugieren la necesidad de evaluar ajustes en la distribución temporal del ciclo semafórico o la implementación de esquemas más flexibles que permitan optimizar la operación de la intersección en función de la demanda real existente como se explica en el punto 3.7.3. Con el cual se logró estipular nuevos tiempos los cuales serán evaluados más adelante.

4.2 Análisis Cinemáticos por Escenario

El análisis cinemático realizado permitió caracterizar el comportamiento dinámico de los vehículos durante su desplazamiento por la intersección estudiada. Los resultados obtenidos evidencian variaciones significativas en las variables de velocidad, aceleración, desaceleración y tiempos de los modos de operación, reflejando la influencia directa de los tiempos semafóricos y del nivel de demanda vehicular.

Los resultados obtenidos fueron mediante las simulaciones desarrolladas en VISSIM. El software registra el comportamiento de los vehículos de forma individual, sin embargo, en esta investigación se presenta un resultado general, con el propósito de lograr describir un comportamiento general de todos los vehículos en la intersección para cada escenario evaluado. Los resultados obtenidos corresponden al análisis realizado con el ciclo semafórico actual, y para dos propuestas de nuevos ciclos semafóricos. El Escenario actual está conformado por un ciclo semafórico de 90s, distribuido en 41s de luz verde en

la calle Simón Bolívar y 41s para la calle Miguel Oviedo, conjuntamente de 4s en luz amarilla para cada fase, la Propuesta 1 mantiene el ciclo de 90s, sin embargo, incorpora una optimación en los tiempos de verde, los cuales fueron modificados a 51s para la calle Simón Bolívar y 35s para la calle Miguel, manteniendo el mismo tiempo en luz amarilla el cual es de 4s. Finalmente, la Propuesta 2 corresponde a una propuesta desarrollada mediante el método de Webster con un ciclo semafórico de 45s, con tiempos de verde de 22 segundos para la calle Simón Bolívar y 14 s en la calle Migues Oviedo, y 4s de luz amarilla para cada una de las fases. A continuación, se describirá las variables cinemáticas evaluadas.

4.2.1 Velocidad promedio

En la Figura 58 se presenta la velocidad promedio obtenida para la calle Simón Bolivar, la calle Miguel Oviedo y además el promedio total en los tres escenarios analizados. En la calle Simón Bolívar se presenta un comportamiento muy característico, la velocidad promedio aumenta de manera progresiva empezando en el escenario actual con 19 km/h, pasando al Propuesta 1 con 22,2 km/h representado un incremento del 16,8% y en el caso del Propuesta 2 con 23,2 km/h equivalente a uno mejora mayor del 22,1%. Este incremento logra una evidencia de mejora continua en lo que son las condiciones de circulación, reduciendo restricciones que afectaban a la movilidad en el escenario existente.

Por su parte en la calle Miguel Oviedo, el escenario actual registra una velocidad promedio de 23,4 km/h, en el Propuesta 1 se observa una disminución cerca de los 20,8 km/h, representando una reducción del 11,1%. Posteriormente, en el Propuesta 2 la velocidad vuelve a incrementarse con un valor de 23,3 km/h alcanzando un valor similar al de manera inicial con una variación de tan solo 0,4%. Ya en conjunto, con los resultados obtenidos se muestra que la propuesta correspondiente al Propuesta 2 proporciona un mejor desempeño operacional de la intersección, al incrementar la velocidad promedio global, equilibrando las condiciones entra ambas vías.

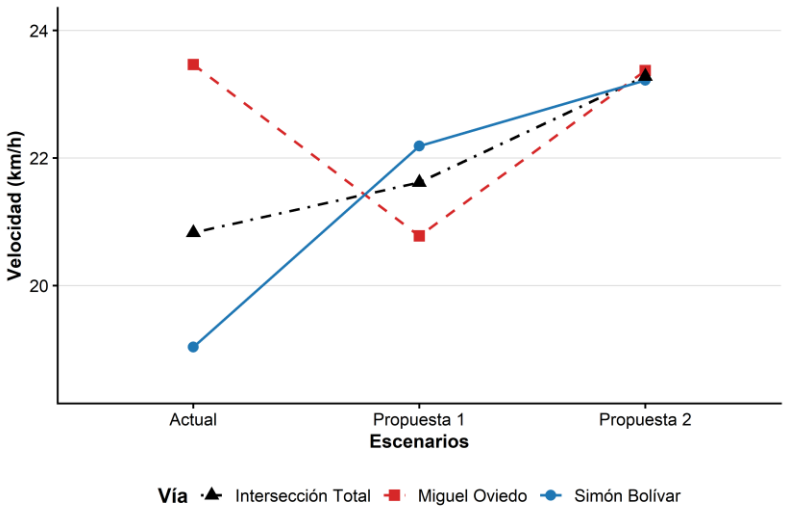


Figura 58. Velocidad promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm (Autoría Propia)

4.2.2 Aceleración positiva promedio

En la Figura 59 se presenta el registro de las calles Simón Bolivar, y Miguel Oviedo, así como el promedio general de la intersección, en los tres escenarios evaluados. En la calle Simón Bolivar, la aceleración positiva promedio presenta en el escenario actual un valor del 0,91m/s² a 0,76 m/s² en el Propuesta 1 lo que representa una reducción del 16,5%. Posteriormente en el Propuesta 2, el valor aumenta a 0,87 m/s² lo que todavía permanece 4,4% por abajo del valor inicial. Este comportamiento se debe a la redistribución de los tiempos verdes el cual permitió una incorporación más progresiva durante el Propuesta 1, mientras que el ciclo reducido del Propuesta 2 favoreció una recuperación de la velocidad mediante aceleraciones a mayor intensidad.

Por otro lado, en la calle Miguel Oviedo se observa algo totalmente distinto. La aceleración positiva promedio aumenta desde un 0,77 m/s² en un escenario actual a un 0,89 m/s² en el Propuesta 1 siendo un incremento del 15,6% y un 0,90 m/s² en el Propuesta 2, equivalente a un aumento del 16,9% respecto al Escenario actual. Este incremento por su lado puede atribuirse de igual manera a la reducción de los tiempos efectivos de verde, lo que haría que los conductores tengan que acelerar con mayor intensidad. En general, el Propuesta 1 presenta una menor aceleración positiva, indicando un comportamiento vehicular uniforme. En relación, el Propuesta 2 registra el valor más alto, sin embargo,

este resultado debe ser analizado juntamente con las demás variables cinemáticas, para de esta manera evaluar el desempeño conjunto de la intersección.

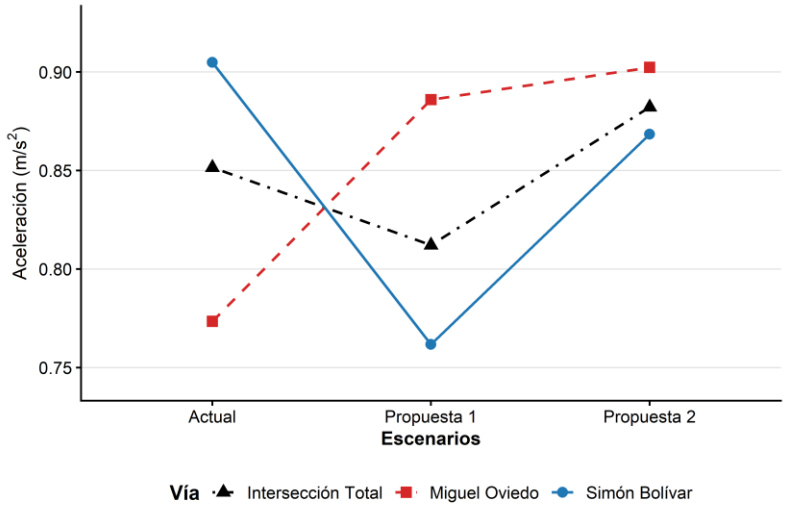


Figura 59. Aceleración positiva máxima por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. (Autoría Propia)

4.2.3 Desaceleración promedio

En la Figura 60 se presentan los resultados de la desaceleración promedio modelados entre tres escenarios evaluados. El escenario actual registro un valor aproximado de -0,55 m/s², mientras que el Propuesta 1 mantiene un comportamiento similar de -0,54 m/s², equivalente a una disminución de frenado del 1,8%, mientras que el Propuesta 2 alcanzo una desaceleración promedio cercada de 0,60 m/s², representando así un incremento en la intensidad media de frenado con un 9,1%,

Al analizar el comportamiento por aproximación, se observa que con la redistribución de los tiempos de verdes aplicada en el Propuesta 1 se redujo la magnitud en la calle Simón Bolívar, pasando de -0,53 m/s² a -0,45 m/s², representando una magnitud de frenado del 15,1%. Este comportamiento indica que existe una circulación más uniforme, lo que produce que no exista una necesidad de realizar frenadas bruscas antes de ingresar a la intersección. En relación, la calle Miguel Oviedo presento un incremento progresivo de la desaceleración en relación que se implementaron las propuestas semafóricas, pasando de un -0,60 m/s² en el escenario actual a -0,67 m/s², en el Propuesta 1 referente al 11,7% y -0,70 m/s en el Propuesta 2, equivalente a un aumento del 16.7% esto debido a la reducción de tiempos de verde en esta calle, por lo cual las maniobras de frenado serian con una mayor frecuencia. Desde el punto de vista operacional, esto representa algo negativo por lo que representa una mejor fluidez en el tránsito, un incremento de

emisiones y un alto consumo de combustible. En términos generales, el Propuesta 2 mejora las condiciones de circulación en la calle Simón Bolivar, sin embargo, hay un desbalance ya que en la calle Miguel Oviedo se incrementó la intensidad de frenado.

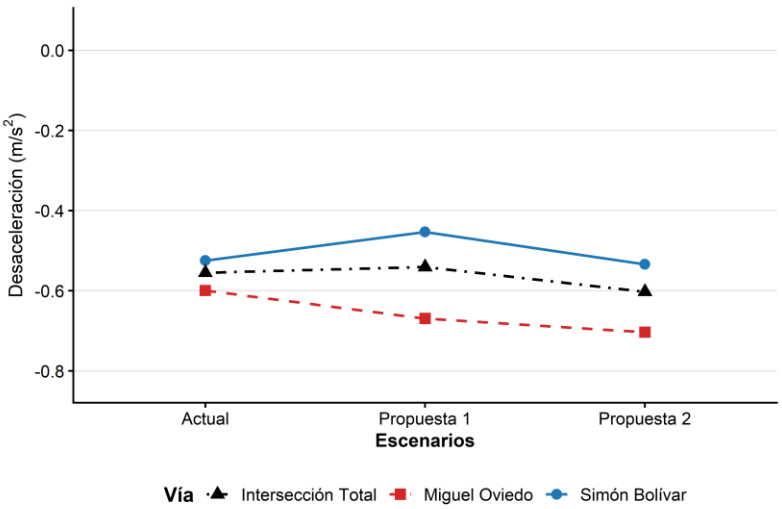


Figura 60. Desaceleración promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. (Autoría Propia)

4.2.4 Número de paradas

En la Figura 61 se presenta la comparación del número promedio de paradas por vehículo en las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo, además del valor total para los tres escenarios evaluados. En la calle Simón Bolivar, el número de paradas disminuyo de aproximadamente 0.64 paradas por vehículo en el escenario actual a 0.49 en el Propuesta 1, lo que representa una reducción del 23,4 %. En el Propuesta 2 el indicador aumento a un 0.59 paradas por vehículo, sin embargo, el valor sigue siendo favorable en un 7,8%. Este comportamiento al ser una menor cantidad de paradas refleja una circulación sin tantas detenciones innecesarias lo que ayuda a reducir los tiempos de viaje.

Al contrario, la calle Miguel Oviedo presento una tendencia totalmente opuesta. El número de paradas se incrementó de unas 0,51 paradas por vehículo a un 0,61 representando un incremento de 21,1 % en el Propuesta 1 y por parte del Propuesta 2 el valor fue de 0,60, siendo aun mayor con un 17,9% del ciclo actual. Este comportamiento se lo atribuye a la reducción en los temas de verdes, ya sea para un valor negativo como en la calle Simón Bolívar o un valor positivo en la calle Miguel Oviedo. En términos

generales de igual manera se genera un balance entre ambas aproximaciones, dando como resultado algo positivo al final del análisis.

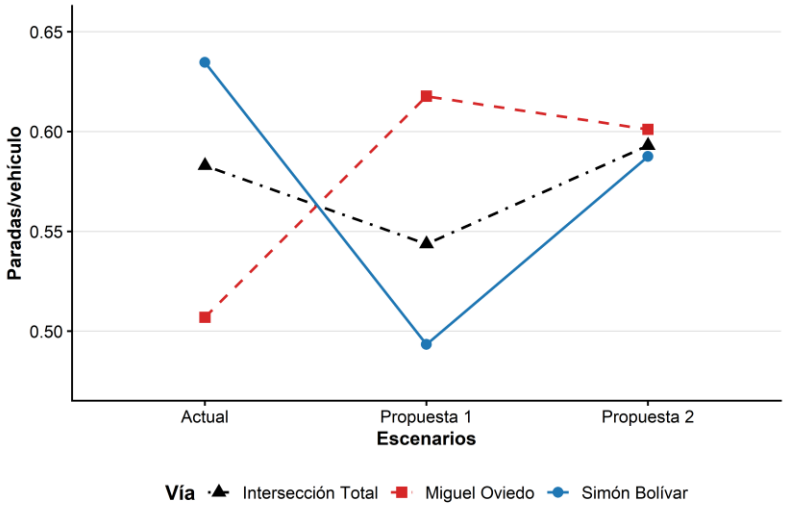


Figura 61. Número de paradas promedio por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. (Autoría Propia)

4.2.5 Tiempos de modos de operación.

La Figura 74 presenta la distribución porcentual del tiempo de operación de los vehículos en los modos de ralentí, desaceleración, crucero y aceleración para los tres escenarios analizados. Los resultados se muestran para las calles Miguel Oviedo (MO), Simón Bolívar (SB) y el promedio total de la intersección (TE).

En el promedio total de la intersección se observe una modificación significativa en la distribución en los estados que operen conforme a los tiempos semafóricos. En el Escenario actual tiene porcentajes bastantes altos lo que representa que se realizan con el vehículo detenido o a muy baja velocidad. En el Propuesta 1, el más representado es el tiempo en ralentí ya que disminuye a un 30,8 % mientras que los tiempos en los modos de aceleración, crucero y desaceleración, presentan un incremento, esta distribución del ciclo semafórico sugiere una reducción del tiempo de vehículos favoreciendo a los modos que involucran a los vehículos en movimiento.

Al contrario, en el Propuesta 2 se presentan variaciones más significativas. El tiempo de ralentí disminuye a un 49,3%, de manera paralela el tiempo de aceleración aumenta a 30,9% el tiempo de desaceleración alcanza un 28,5 % y el tiempo crucero se incrementa

hasta un 22%. Esto nos muestra que los vehículos sufren menos detenciones y tienen un mejor rendimiento en sí mismos.

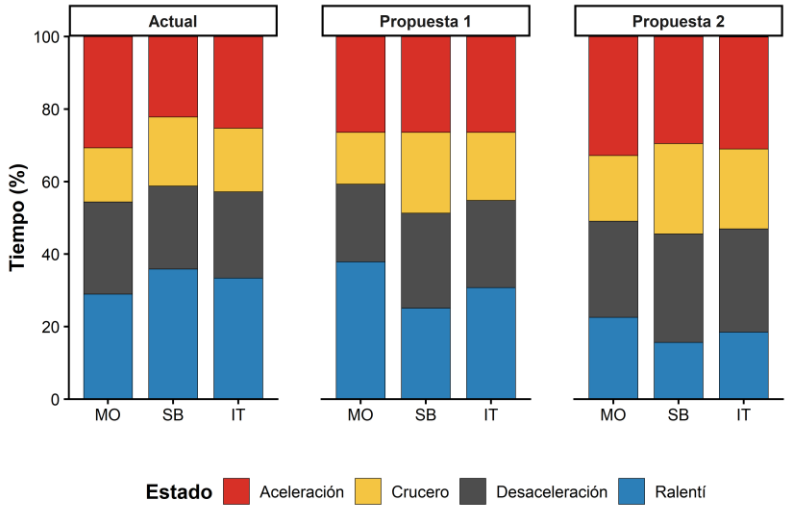


Figura 62. Distribución porcentual de modos de operación (Jueves 11:00–12:00) (Autoría Propia)

Por otro lado, la Figura 63 presenta un esquema del tiempo promedio expresado en segundos de todos los modos de operación, tanto para las calles Simón Boliv.ar, Miguel Oviedo y el promedio del Escenario total. A diferencia de la figura anterior, donde se reflejaba una distribución porcentual del tiempo de operación, este grafico por su lado permite cuantificar la duración efectiva de cada modo operacional.

En el modo de ralentí, en la calle Simón Bolívar se presenta una reducción progresiva de cerca de 15,7s a 5,2s. En contraste con la calle Miguel Oviedo, el tiempo aumenta de 10,7s para el escenario actual, a 16,3s para el Propuesta 1, para luego obtener disminuir hasta 7,8s en el Propuesta 2. Por lo cual, el Propuesta 2 es un promedio de disminución. A su vez, el tiempo de aceleración presenta cambios relativamente mente mínimos en ambas vías, La calle Miguel Oviedo registra valores a 11,3s, mientras que la calle Simón Bolívar mantiene valores alrededor de los 9,7s, reflejando así que las modificaciones en los ciclos semafóricos no generan relevancia para este modo de operación.

El tiempo de desaceleración, de igual manera presenta escasas variaciones. Los segundos fueron mínimos por lo que haciendo un balance tanto para la calle Simón Bolívar como para la calle Miguel Oviedo nos da un promedio cercano a 9,5s. Finalmente el modo crucero su variación se evidencia con una reducción en la calle Simón Bolívar y un incremento en la calle Miguel Oviedo respecto al escenario actual. El promedio del

escenario aumenta ligeramente entre el escenario actual y la Propuesta 1, pero manteniéndose prácticamente constante con la Propuesta 2.

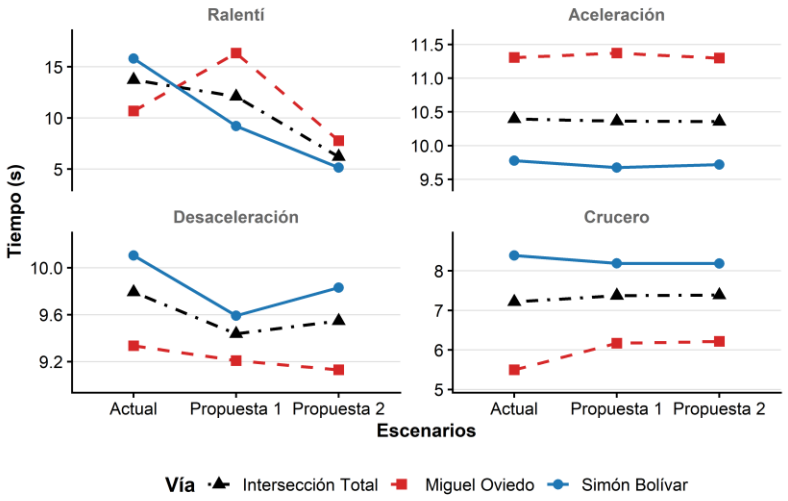


Figura 63. Tiempos promedio de operación vehicular en los modos de operación (Autoría Propia)

4.3 Análisis de Emisiones y Consumo de Combustible por Escenario

De manera similar el análisis de emisiones y consumo de combustible nos ayudó a entender el comportamiento que obtiene la intersección cuando los vehículos pasan y se mantienen estacionados en el semáforo, a continuación se describirán las variables consideras.

4.3.1 Emisiones de NOx

En la Figura 64 se presentan las emisiones de óxidos de nitrógeno (Nox) registradas en las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo para los tres escenarios evaluados. Los resultados muestras el cómo ambas aproximaciones responden de manera diferente a los cambios implementados en la configuración semafórica.

En la calle Simón Bolívar se observa una disminución de manera progresiva de las emisiones de Nox conforme se van implementando propuestas que ayudan a una optimización. Las emisiones se reducen de 78g en el escenario actual a 65g en la Propuesto 1, representando una disminución cercana al 16,7%. Por su parte, en la Propuesta 2 las emisiones llegan a 61g, equivalente a una reducción favorable del 21,8%. Por lo que esto representa un valor favorable, evidenciado que se obtendrá una circulación más eficiente.

Por el contrario, en la calle Miguel Oviedo se observa un incremento de las emisiones en la Propuesta 1, pasando de 45g a 52g, obteniendo un aumento cerca del 15,6%, sin

embargo, para la Propuesta 2 se presenta una disminución casi similar al Escenario Actual cerca de los 44g, lo que representa una disminución del 2,2%, lo que indicaría un balance con lo ocurrida en la propuesta anterior. Finalmente, los resultados nos muestran que la Propuesta 2 presenta mejoras no solo en condiciones vehicular, sino que también contribuyen a la disminución de gases contaminantes.

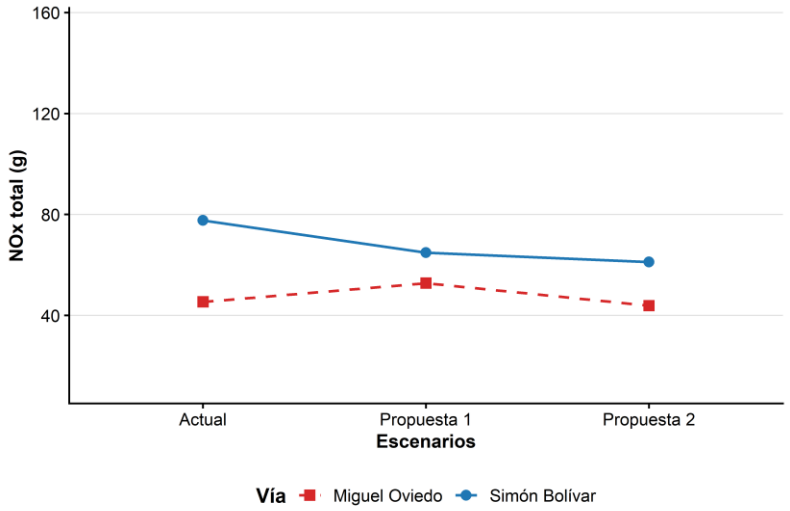


Figura 64. Emisiones de NOx por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. (Autoría Propia)

4.3.2 Consumo de Combustible

En la Figura 65 se presenta el consumo de combustible registrado en las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo para los tres escenarios evaluados. Por su lado, en la calle Simón Bolívar se observa una disminución progresiva del consumo de combustible. El escenario actual registra un consumo aproximado de 5,71L mientras que en la Propuesta 1 el valor disminuye a un 4,77L, equivalente a un 16,5% respecto al valor inicial. El consumo por su parte en la Propuesta 2, alcanzo una disminución del 21,2% con un consumo de 4,5L, lo que representa un comportamiento favorable para los vehículos que circulan por dicha intersección.

Al contrario, en la calle Miguel Oviedo su comportamiento fue diferente. El consumo en el Escenario actual fue de 3,34L existiendo un incremento con respecto a la Propuesta 1 la cual se registró en 3,89L, atribuyéndose un incremento del 16,5%. Este resultado puede atribuirse a la redistribución de los tiempos de verde. Sin embargo, con la Propuesta 2, se logró algo diferente, puesto que el consumo disminuyo hasta 3,23L, representado un 3,3% con respecto al Escenario actual 1, además de un 17% respecto a la Propuesta 1, por lo que este resultado logra evidenciar una recuperación en las condiciones de circulación y

haciendo el más optimo puesto que también se logró un balance con respecto a la Calle Simón Bolivar.

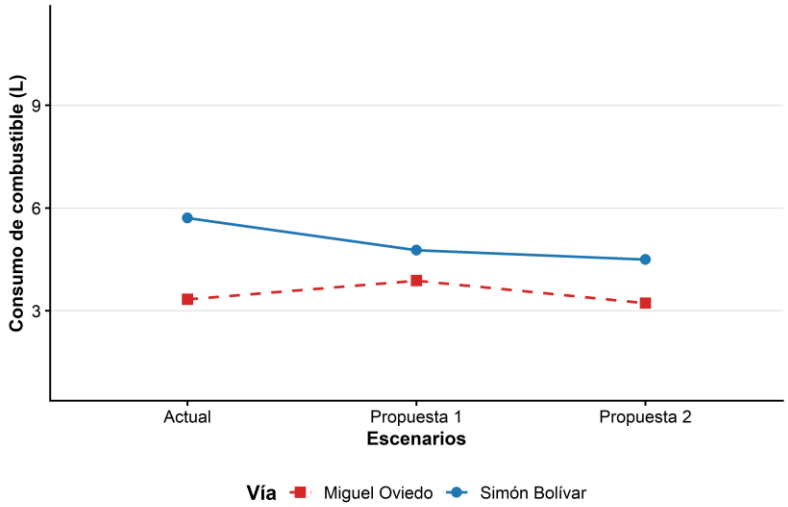


Figura 65. Consumo de Combustible por Escenario Dia Jueves de 11am a 12pm. (Autoría Propia)

4.4 Comparación General Escenarios

En la Tabla 18 se presenta un resumen comparativo de los principales indicadores cinemáticos y ambientales obtenidos para los tres escenarios evaluados, tomando como referencia el escenario actual. Los resultados expresados en la tabla muestran que ambas propuestas generan mejoras en el desempeño de la intersección, sin embargo, varía según el indicador analizado.

La Propuesta 1 incrementa la velocidad promedio en un 1,4 % al mismo tiempo que reduce el tiempo en ralentí a un 10,90%, las emisiones de NOx en un 4.1 % y el consumo de combustible en un 4,40%, sin embargo, en el tiempo en la circulación en crucero se presenta un incremento del 2,8 %. Estos resultados evidencian una mejora moderada para las condiciones de circulación y para el desempeño ambiental.

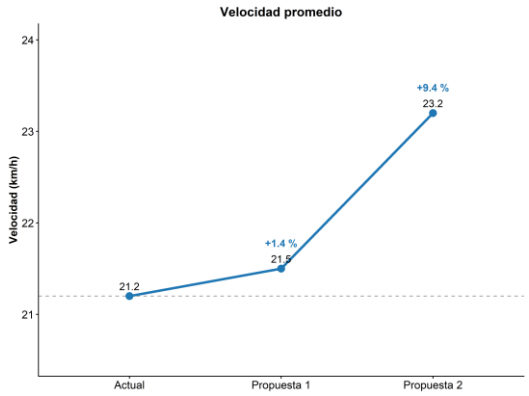
Por su parte, la Propuesta 2 presenta un comportamiento más favorable entre los escenarios evaluados. La velocidad promedio aumenta un 9,40 % respecto al escenario actual, el tiempo en ralentí disminuye significativamente en un 54,7 % representado más de la mitad del tiempo en el escenario actual. De la misma manera, el tiempo en modo crucero se mantiene estable con un incremento del 2,8% reflejando una circulación continua y estable. En el tema ambiental las emisiones de NOx como el consumo de combustible presentan una disminución del 14,6% en ambos apartados. En un análisis general las dos propuestas son ideales para mejorar el rendimiento de la intersección

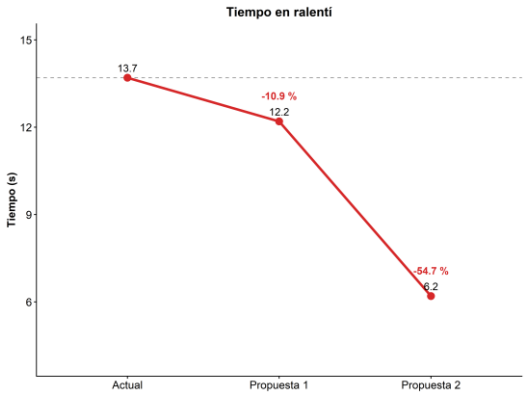
analizada tanto al mejorar la movilidad vehicular como reducir el impacto ambiental y el consumo energético.

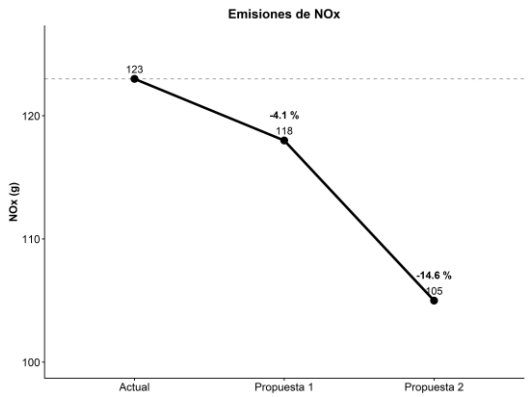
Tabla 18. Comparación de Escenarios

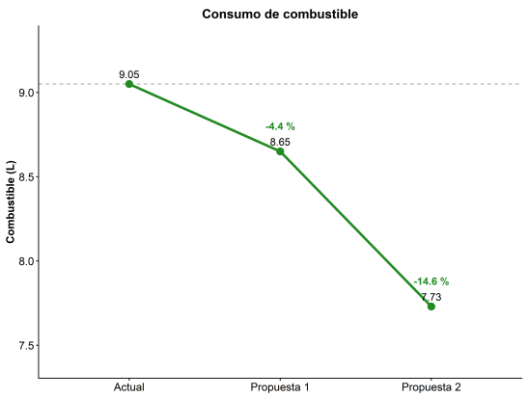
Escenarios	Vel.Prom. (km/h)	Dif. vel. (%)	Tiempo en Ralentí (s)	Dif. t.r. (%)	Tiempo en Crucero (s)	Dif. t.c. (%)	Emisiones de Nox (g)	Dif NOx (%)	Consumo de Combustible (L)	Dif. consumo (%)
Actual	21.2	-	13,7	-	7,2	-	123	-	9.05	-
Propuesta 1	21.5	+1.4	12.2	-10.9	7,4	+2,8	118	-4,1	8.65	-4.4
Propuesta 2	23.2	+9,4	6.2	-54,7	7,4	+2,8	105	-14,6	7,73	-14,6

(Autoría Propia)









CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se desarrollo satisfactoriamente el análisis de los fundamentos teóricos relacionados con la cinemática vehicular, el comportamiento del tráfico y la generación de emisiones contaminantes. La revisión bibliográfica evidencio que las variaciones en la velocidad, aceleración, desaceleración influyen de manera directa en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. A partir del desarrollo del estudio, se confirmó que el análisis de las variables cinemática constituye un aspecto fundamental dentro de los estudios de movilidad, aunque sus efectos no siempre son perceptibles, tienen una gran incidencia en el desempeño del transito y el impacto ambiental.
- Se desarrolló satisfactoriamente la campaña experimental en la intersección semaforizada de las calles Simón Bolivar y Miguel Oviedo en la cuidad de Ibarra, mediante un registro automático con una cámara Dahua Access ANPR y un aforo manual. El monitoreo automático permitió caracterizar el comportamiento del tránsito a lo largo de una semana, mientras que el levantamiento manual se realizó en tres días representativos (lunes, jueves y sábado) en tres franjas horarias (11:00–12:00, 14:00–15:00 y 17:00–18:00) obteniendo un total de 18 periodos de observación, identificando un flujo de 300 a 500 veh/h en la calle Simón Bolívar y entre 200 a 400 veh/h en la calle Miguel Oviedo. Con la información recopilada, se logró identificar la actividad vehicular, la composición de la flota y establecer la base para la calibración del modelo de simulación para los diferentes escenarios analizados.
- Se modelo satisfactoriamente el tráfico vehicular, el comportamiento cinemático y de emisiones vehiculares durante un periodo de una hora mediante el software PTV Vissim considerando diferentes configuraciones de ciclos semafóricos. La simulación permitió obtener información cinemática con una frecuencia de muestreo de 1Hz, proporcionando datos representativos del comportamiento de los vehículos y permitiendo una estimación más precisa de las emisiones de NOx y el consumo de combustible.
- Se implemento satisfactoriamente dos nuevas propuestas de optimización semafórica mediante el método de Webster, evitando establecer tiempos de

manera empírica o aleatoria. La primera propuesta mantuvo un ciclo de 90s, pero se ajustó los tiempos de verde a 51s y 36s según la demanda vehicular. La segunda propuesta estableció un nuevo ciclo semafórico de 45s con tiempos de verde de 24s y 17s. La evaluación de ambas propuestas mediante la simulación en el software VISSIM y el procesamiento en RStudio, permitió comprobar que la aplicación de este método es una herramienta eficaz para el funcionamiento operaciones en las intersecciones semaforizadas.

- La comparación entre el escenario actual y las propuestas de optimización semafórica, demostrando que la modificación de los tiempos de verde influye directamente en el comportamiento cinemático. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar un incremento progresivo de la velocidad, la reducción en tiempos de ralentí. De las dos propuestas planteados, la Propuesta 2 presento el mejor desempeño para la intersección, tras alcanzar un incremento del 9,4% en la velocidad promedio, la disminución del 54,7% en el tiempo ralentí demostrando así que la investigación realizada se efectuó con éxito.
- En el análisis de emisiones por otra parte se evidencio que ambas propuestas de optimización generaron mejores con respecto al escenario actual. En la propuesta 1 permitió una reducción entre 4% a 4,5 % tanto en emisiones de NOx como del consumo de combustible, mientas que la propuesta 2 presento una disminución del 14,6% en ambos casos, siendo la alternativa con un beneficio ambiental mejorado. Estos resultados confirmaron que la optimización en tiempos semafóricos tiene un impacto directo con el desempeño de los vehículos en una intersección semaforizada.

5.2 Recomendaciones

- Se recomiendo para futuras investigaciones el uso de una licencia profesional o una versión de VISSIM con funcionalidad avanzadas para el módulo de emisiones con el fin de poder obtener datos y resultados de a nivel individual por vehículo. En la presente investigación, debido a las limitaciones de la licencia académica, el análisis de las emisiones de NOx y del consumo de combustible se realizó mediante los resultados generados por nodos. Si bien esta metodología permitió cumplir satisfactoriamente los objetivos planteados, se puede llegar a un análisis más detallado y preciso.
- De igual manera, se recomiendo que futuras investigaciones incorporen los movimientos de giro que efectúan los vehículos dentro del modelo de simulación en PTV VISSIM, debido a que la inclusión de los porcentajes de giro representara las condiciones reales que operan en la intersección, mejorando la precisión el análisis en futuras investigaciones.
- Se recomienda implementar los perfiles cinemáticos obtenidos por PTV VISSIM, en otros programas de simulación y modelación como MOVES, COOPERT, SUMO. La implementación en estos softwares nos ayudara a comparar las diversas metodologías en la estimación de emisiones. Asimismo, facilitara el estudio en redes viales más extensas.
- Para futuras investigaciones se recomienda desarrollar un manual para el cálculo en ciclos semafóricos, en entornos basados en metodologías como el método de Webster u otros procedimientos dentro de la ingeniería del transporte, para facilitar la planificación y la aplicación de los procedimientos analizados. De igual manera considerando que la presente investigación fue realizada a nivel microscópico y se centró en una única intersección, se recomienda ampliar el alcance de futuros estudios hacia redes de intersección o incluso corredores viales.

Referencias

ACELA. (2020). *La combustión y/o la evaporación del combustible resultan en las emisiones producidas por vehículos.* https://www.acela.org/es/fuel-basics/fuels-and-emissions-101.

Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos. (2024, mayo 2). *Monóxido de carbono en exteriores*. https://espanol.epa.gov/espanol/monoxido-de-carbono-en-exteriores.

AirGradient. (2026). *AirGradient Open Air Quality Platform (Dashboard)*. https://www.airgradient.com.

AirGradient Ltd. (2024). *"AirGradient Open Air — Outdoor Air Quality Monitor (Model O-1PST) Specifications,"*. https://www.airgradient.com

Albool, I., Ashqar, H. I., Elhenawy, M., Hussain, Q., Alhajyaseen, W., Rakha, H., & Stohy, A. (2023). Fuel consumption at signalized intersections: Investigating the impact of different signal indication settings. *Case Studies on Transport Policy*, *13*, 101022. https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2023.101022

Altumm. (2022). *Teoría de colas*. https://es.linkedin.com/pulse.

Bhandari, A., Patel, V., & Patel, M. (2018). A Survey on Traffic Congestion Detection and Rerouting Strategies. *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2018*, 42–44. https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553965

Bielaczyc, P., Woodburn, J., & Szczotka, A. (2014). An assessment of regulated emissions and CO2 emissions from a European light-duty CNG-fueled vehicle in the context of Euro 6 emissions regulations. *Applied Energy*, *117*, 134–141. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.12.003

Bogaerts, T., Masegosa, A. D., Angarita-Zapata, J. S., Onieva, E., & Hellinckx, P. (2020). A graph CNN-LSTM neural network for short and long-term traffic forecasting based on trajectory data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *112*, 62–77. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2020.01.010

Boulter, P. G. B. T. J. M. I. S. L. S. B. T. (2009). *Emission factors 2009: Final summary report Emission factors 2009: Final summary report Approvals Project Manager Quality Reviewed*. *1*.

Cárdenas Grisales, J. (2018). *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones* (Alfaomega).

Comisión Europea. (2023, marzo 7). *El cambio climático y la relevancia de la demografía*. https://cordis.europa.eu/article/id/32652-climate-change-demographics-matter/es

CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES DE FUENTES MÓVILES TERRESTRES., https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-017.pdf (2008).

Di Stasi, L. L., Angioi, F., Bassani, M., Diaz-Piedra, C., & Megias-Robles, A. (2022). The effect of traffic light spacing and signal congruency on drivers' responses at urban intersections. *Transportation Engineering*, *8*, 100113. https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2022.100113

Di, W., Yue, Z., Junfeng, W., Qi, W., & Xiaodong, L. (2023). Establishment and effect analysis of traffic load for long-span bridge via fusion of parameter correlation. *Structures*, *55*, 1992–2002. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.07.012

Diario el Norte. (2020). Congestión Vehicular. *https://www.elnorte.ec*.

Ding, N., Guo, P., Xi, Y. H., Zhang, A., & Lei, X. (2024). Low-carbon development in power systems based on carbon emission analysis models: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *65*, 103774. https://doi.org/10.1016/J.SETA.2024.103774

EDISON ANDRÉS PUENAYÁN PIÑÁN. (2018). *"PLAN DE MARKETING DE SERVICIOS PARA EL CENTRO DE MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ TEAM SERVICE, UBICADO EN EL CANTÓN IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA*. UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE.

Enríquez Aldás David, R. C. E. (2018). *"DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA PARA LA TEMPORIZACIÓN DE SEMÁFOROS EN LA CIUDAD DE IBARRA"*. Universidad Técnica del Norte.

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories*.

European Environment Agency (EEA). (2025). *COPERT – Computer model to calculate emissions from road traffic*. https://copert.emisia.com/?utm_source.

Fernandes, P., Coelho, M. C., & Rouphail, N. M. (2017). Assessing the impact of closely-spaced intersections on traffic operations and pollutant emissions on a corridor level. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *54*, 304–320. https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.05.016

Forehead, H., & Huynh, N. (2018). Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science. *Environmental Pollution*, *241*, 775–786. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.06.019

Gianluca Merlo. (2023, abril 11). *Por qué el transporte de bajas emisiones es clave para América Latina y el Caribe*. https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/por-que-el-transporte-de-bajas-emisiones-es-clave-para-america-latina-y-el-caribe.

Google. (2025). *Gemini.*

Gordon, T., Balakrishnan, K., Dey, S., Rajagopalan, S., Thornburg, J., Thurston, G., Agrawal, A., Collman, G., Guleria, R., Limaye, S., Salvi, S., Kilaru, V., & Nadadur, S. (2018). Air pollution health research priorities for India: Perspectives of the Indo-U.S. Communities of Researchers. *Environment international*, *119*, 100. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.06.013

Han, D., E, J., Feng, C., Han, C., Kou, C., Tan, Y., Peng, Y., & Wei, L. (2024a). Experimental and simulation investigation on the different iron content beta zeolite for controlling the cold-start hydrocarbon emission from a gasoline vehicle. *Energy*, *294*, 130954. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130954

Han, D., E, J., Feng, C., Han, C., Kou, C., Tan, Y., Peng, Y., & Wei, L. (2024b). Experimental and simulation investigation on the different iron content beta zeolite for controlling the cold-start hydrocarbon emission from a gasoline vehicle. *Energy*, *294*, 130954. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130954

Heni, L., Haj-Salem, H., Lebacque, J. P., & Slimi, K. (2024). Integrating the Bi-dimensional-GSOM traffic flow interfaced models with a macroscopic emission model for very large-scale traffic networks. *Transportation Research Procedia*, *78*, 254–263. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2024.02.033

HIKVISION. (2022). *iDS-TCD403-BI 4 MP IR Traffic Flow Camera Data Sheet*. https://assets.hikvision.com/prd/public/all/doc/m000019939

INEC. (2023, septiembre 21). *Ecuador creció en 2.5 millones de personas entre 2010 y 2022*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-crecio-en-2-5-millones-de-personas-entre-2010-y-2022/.

Ingartek Consulting. (2021). *Estudio de tráfico de carreteras: densidad, intensidad y velocidad*. https://www.ingartek.com/es/tres-claves-para-el-estudio-de-trafico-de-carreteras-la-densidad-la-intensidad-y-la-velocidad/

International Council on Clean Transportation. (2014). *Evolución de los estándares de emisión vehicular e idoneidad tecnológica*. https://theicct.org/.

Jay Heizer. (1996). *Production and operations management: Strategic and tactical decisions* (Prentice Hall, Vol. 4).

José Roberto Marcillo del Castillo. (2021). *"MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR EN HORAS PICO PARA EL CENTRO DE LA CIUDAD DE IBARRA, A TRAVÉS DE UNA RED AD - HOC VANET "* [Tesis de Maestría]. Universidad Técnica del Norte.

Khreis, H., Warsow, K. M., Verlinghieri, E., Guzman, A., Pellecuer, L., Ferreira, A., Jones, I., Heinen, E., Rojas-Rueda, D., Mueller, N., Schepers, P., Lucas, K., & Nieuwenhuijsen, M. (2016). The health impacts of traffic-related exposures in urban areas: Understanding real effects, underlying driving forces and co-producing future directions. *Journal of Transport & Health*, *3*(3), 249–267. https://doi.org/10.1016/J.JTH.2016.07.002

Kleinrock, L. (1975). *Queueing Systems. Volume 1: Theory* (John Wiley & Sons).

Lara, C. J. G. M. F. M. S. L. D. G. T. R. W. G. M. M. M. E. G. A. (2009). *Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana*. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.

Li, S., Tong, Z., & Haroon, M. (2024). Estimation of transport CO2 emissions using machine learning algorithm. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *133*, 104276. https://doi.org/10.1016/J.TRD.2024.104276

Li, Y., Zhu, W., & Li, S. (2017). Signal control effects on vehicular traffic emissions through a sequence of traffic lights. *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017*, *2017-January*, 1930–1935. https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243085

Lin, Y., Guan, H., Lu, K., Ma, Y., & Zhao, S. (2022). Eco-oriented signal control of intersections with vehicle type considerations using integrated estimation of driving behavior. *Journal of Cleaner Production*, *375*, 133986. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133986

Liu, C., Pei, Y., Wu, C., Zhang, F., & Qin, J. (2023). The impact of the variation in driving conditions on the NOx emissions characteristics in PEMS test for heavy-duty vehicle. *Journal of Engineering Research*. https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.10.024

Ma, Q., Wang, X., Niu, S., Zeng, H., & Ullah, S. (2024). Analysis on congestion mechanism of CAVs around traffic accident zones. *Accident Analysis & Prevention*, *205*, 107663. https://doi.org/10.1016/J.AAP.2024.107663

Moniot, M., Lustbader, J., Wood, E., Lee, B., Fink, J., & Agnew, S. (2022). A framework for characterizing the ambient conditions experienced by light duty vehicles in the United

States. *International Journal of Sustainable Transportation*, *16*(2), 137–151. https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1849470

Mukesh, R. S., Deepa, K., & Nithya, M. (2022). Vehicular Emission Monitoring and Alerting System Using IoT. *INDICON 2022 - 2022 IEEE 19th India Council International Conference*. https://doi.org/10.1109/INDICON56171.2022.10040110

Napolitano, P., Di Maio, D., Guido, C., Merlone Borla, E., & Torbati, R. (2023). Experimental investigation on particulate filters for heavy-duty natural gas engines: Potentialities toward EURO VII regulation. *Journal of Environmental Management*, *331*, 117204. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.117204

Nguyen, J., Powers, S. T., Urquhart, N., Farrenkopf, T., & Guckert, M. (2021). An overview of agent-based traffic simulators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *12*, 100486. https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2021.100486

Nicolás Ortuya. (2023, marzo 6). *Cuales son los gases contaminantes que emiten los vehiculos* . https://www.autofact.pe/blog/comprar-auto/caracteristicas/gases-vehiculos

Obando, F. A. R., Cárdenas, C. E. L., Rosero, Z. A. M., & Chandi, C. X. R. (2017). ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN AUTOBUSES URBANOS POR EFECTO DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS. CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE IBARRA. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, *10*(29). https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/633

Obando, F. R., Rosero, X., & Mera, Z. (2024). Developing Fuel Efficiency and CO2 Emission Maps of a Vehicle Engine Based on the On-Board Diagnostic (OBD) Approach. *Enfoque UTE*, *15*(1), 7–15. https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.1002

Organizacion Mundial de la Salud. (2023, diciembre 15). *Contaminación del aire*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health

P. Álvarez López, M. B. L. B.-W. J. E. Y.-P. F. R. H. L. L. J. R. P. W. y E. W. (2018). *Microscopic Traffic Simulation using SUMO*. https://eclipse.dev/sumo

Parlamento Europeo. (2022, junio 14). *Emisiones de CO2 de los coches*. https://www.europarl.europa.eu.

PTV Group. (2025). *Portal de configuraciones y descargas de servicio de PTV Vision*. https://cgi.ptvgroup.com.

PTV Planung Transport Verkehr GmbH. (2024). *"PTV VISSIM — Multimodal microscopic traffic simulation software,"*. https://www.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim?utm_source.

Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, D., & de Andrés, J. M. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Science of The Total Environment*, *566–567*, 416–427. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.05.051

Rafael Cal y Mayor Reyes, J. C. (2018). *Ingeniería del tránsito: Fundamentos y aplicaciones* (Alfaomega Grupo Editor, Ed.; 9a ed.).

ransportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

Sergio, F. H., Leonel, A. M., Sophia, L. M., Augusto, S., Henao, F., Arias Montoya, L., Margarita, L., & De Arias, P. (s/f). *ANALYSIS OF A ROAD SYSTEM MERGING ZONE THROUGH A*

SIMULATION MODEL. ONE SPECIAL CASE. Recuperado el 13 de julio de 2024, de http://es.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A1nsito_

Sergio Navarro. (2008, agosto). *Intersección.* https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/intersecciones1.pdf.

Shang, W. L., Song, X., Chen, Y., Yang, X., Liang, L., Deveci, M., Cao, M., Xiang, Q., & Yu, Q. (2024). Congestion and Pollutant Emission Analysis of Urban Road Networks Based on Floating Vehicle Data. *Urban Climate*, *53*, 101794. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2023.101794

Smirnov, P. I., Karelina, M. Y., & Subbotin, B. S. (2022). Road Transport CO2 Emissions Reduction Degree Assessment when Implementing ITS. *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2022 - Conference Proceedings*. https://doi.org/10.1109/TIRVED56496.2022.9965494

Tarapues Cadena, B. E. (2019). *Modelación de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero de autobuses urbanos de la ciudad de Ibarra*. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9011

Thomson, I. B. A. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales recursos naturales e infraestructura*. *1*, 8–8.

Toro, C., Sonntag, D., Bash, J., Burke, G., Murphy, B. N., Seltzer, K. M., Simon, H., Shephard, M. W., & Cady-Pereira, K. E. (2024). Sensitivity of air quality to vehicle ammonia emissions in the United States. *Atmospheric Environment*, *327*, 120484. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2024.120484

Torres, D. J. G., Mendes, A. de S., & Albuquerque, C. (2024). Performance and emissions data of an internal combustion engine operating with different ethanol/water mixtures and compression ratios. *Data in Brief*, *54*, 110390. https://doi.org/10.1016/J.DIB.2024.110390

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Motor Vehicle Emission Simulator: MOVES5*. https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves?utm_source.

Wang, Z., Luo, K., Yu, H., Feng, K., & Ding, H. (2024). NOx Emission prediction of heavy-duty diesel vehicles based on Bayesian optimization -Gated Recurrent Unit algorithm. *Energy*, *292*, 130559. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130559

Wu, L., Zhang, R., Zhou, R., & Wu, D. (2021). An edge computing based data detection scheme for traffic light at intersections. *Computer Communications*, *176*, 91–98. https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2021.05.014

Xu, S., Sun, C., & Liu, N. (2024). Road congestion and air pollution -Analysis of spatial and temporal congestion effects. *Science of The Total Environment*, *945*, 173896. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.173896

Zhang, Y., Lv, J., & Wang, W. (2013). Evaluation of vehicle acceleration models for emission estimation at an intersection. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *18*(1), 46–50. https://doi.org/10.1016/J.TRD.2012.09.004

Zhao, Y., & Sadeka, A. W. (2013). Computationally-efficient Approaches to Integrating the MOVES Emissions Model with Traffic Simulators. *Procedia Computer Science*, *19*, 882–887. https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2013.06.118

Anexos

Tabla 19. Toma de Datos en la Calle Simón Bolívar

No.	Tiempo Instantáneo	Licencia NO
1	25/4/2025 6:05	Sin placa
2	25/4/2025 6:07	IBB224
3	25/4/2025 6:08	86019
4	25/4/2025 6:10	47
5	25/4/2025 6:10	10
6	25/4/2025 6:11	Sin placa
7	25/4/2025 6:13	AAA21
8	25/4/2025 6:13	SKL7
9	25/4/2025 6:13	GSB6891
10	25/4/2025 6:15	FDT1839
11	25/4/2025 6:15	Sin placa
12	25/4/2025 6:15	VF75
13	25/4/2025 6:17	70535
14	25/4/2025 6:18	PE11650
15	25/4/2025 6:19	JCJ049
16	25/4/2025 6:20	JCJ049
17	25/4/2025 6:20	1CH255
18	25/4/2025 6:21	TBJ5346
19	25/4/2025 6:22	CE153
20	25/4/2025 6:22	IBF4594
21	25/4/2025 6:25	IL5117
22	25/4/2025 6:27	FCQ5250
23	25/4/2025 6:28	IA13305
24	25/4/2025 6:29	1BF3244
25	25/4/2025 6:29	14
26	25/4/2025 6:29	IF95714
27	25/4/2025 6:30	PC2733
28	25/4/2025 6:30	1EC928
29	25/4/2025 6:31	FBS365
30	25/4/2025 6:32	IBB3669
31	25/4/2025 6:32	TCP70
32	25/4/2025 6:32	EJCU119
33	25/4/2025 6:32	FQPDS92
34	25/4/2025 6:33	1FD927
35	25/4/2025 6:35	PDU6092
36	25/4/2025 6:35	1BF7860

37	25/4/2025 6:35	IBA43
38	25/4/2025 6:35	AE4975
39	25/4/2025 6:36	CH9115
40	25/4/2025 6:37	PI3078

Tabla 20. Toma de Datos en la Calle Oviedo

No.	Tiempo Instantáneo	Licencia NO
1	25/4/2025 6:05	Sin placa
2	25/4/2025 6:07	IBB224
3	25/4/2025 6:08	86019
4	25/4/2025 6:10	47
5	25/4/2025 6:10	10
6	25/4/2025 6:11	Sin placa
7	25/4/2025 6:13	AAA21
8	25/4/2025 6:13	SKL7
9	25/4/2025 6:13	GSB6891
10	25/4/2025 6:15	FDT1839
11	25/4/2025 6:15	Sin placa
12	25/4/2025 6:15	VF75
13	25/4/2025 6:17	70535
14	25/4/2025 6:18	PE11650
15	25/4/2025 6:19	JCJ049
16	25/4/2025 6:20	JCJ049
17	25/4/2025 6:20	1CH255
18	25/4/2025 6:21	TBJ5346
19	25/4/2025 6:22	CE153
20	25/4/2025 6:22	IBF4594
21	25/4/2025 6:25	IL5117
22	25/4/2025 6:27	FCQ5250
23	25/4/2025 6:28	IA13305
24	25/4/2025 6:29	1BF3244
25	25/4/2025 6:29	14
26	25/4/2025 6:29	IF95714
27	25/4/2025 6:30	PC2733
28	25/4/2025 6:30	1EC928
29	25/4/2025 6:31	FBS365
30	25/4/2025 6:32	IBB3669
31	25/4/2025 6:32	TCP70
32	25/4/2025 6:32	EJCU119

33	25/4/2025 6:32	FQPDS92
34	25/4/2025 6:33	1FD927
35	25/4/2025 6:35	PDU6092
36	25/4/2025 6:35	1BF7860
37	25/4/2025 6:35	IBA43
38	25/4/2025 6:35	AE4975
39	25/4/2025 6:36	CH9115
40	25/4/2025 6:37	PI3078