



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“MODELADO A MICROESCALA DEL TRÁFICO Y LAS EMISIONES
VEHICULARES EN UNA INTERSECCIÓN DE LA CIUDAD DE IBARRA”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Alex Marcelo Caiza Yépez

DIRECTOR:

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.

Ibarra – Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

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			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1050144813		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Caiza Yépez Alex Marcelo		
DIRECCIÓN:	24 de Mayo 1-85 y Cristobal de Troya		
EMAIL:	amcaizay@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0984075271

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Modelado a microescala del tráfico y las emisiones vehiculares en una intersección de la ciudad de Ibarra.
AUTOR (ES):	Caiza Yépez Alex Marcelo
FECHA: AAAAMMDD	2025/11/24
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR:	Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD

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 24 días, del mes de noviembre de 2025

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Alex Marcelo Caiza Yépez

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 21 de noviembre de 2025

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.

f)

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando PhD

C.C.: 1002641742

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Modelado a microescala del tráfico y las emisiones vehiculares en una intersección de la ciudad de Ibarra.” elaborado por Alex Marcelo Caiza Yépez, 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

A mis padres, Graciela Yépez y Marcelo Caiza, por su amor incondicional, apoyo constante y confiar en mí sin dudar que lo iba a lograr.

A mis hermanas, Juliana e Iveth, por su amor y su apoyo.

A mi abuelita, Zoila Merlo, quien siempre confió en mi y hoy estaría muy orgullosa de este logro.

A Alex, por no rendirse y conseguir superar cada obstáculo para lograr esta meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas quienes formaron parte de este proceso.

A mis padres, Graciela y Marcelo, por su amor incondicional y por apoyarme acompañándome en todo momento y brindándome el apoyo y la confianza necesarios para lograr esta meta. Gracias por creer en mí.

A mis hermanas, Juliana e Iveth, por su amor y por su apoyo, gracias por acompañarme y ayudarme siempre que lo necesitaba.

A mi director de tesis, Fredy Rosero, por su apoyo, guía, paciencia, motivación y consejos para lograr que este proyecto se lo realice de la mejor manera.

Agradezco de igual manera a todos mis docentes de la carrera, quienes fueron parte de este proceso compartiendo su conocimiento y experiencia contribuyendo en mi formación profesional y personal.

Y a mis amigos, gracias por su amistad, por sus palabras de aliento y hacer de este proceso una mejor experiencia.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda el problema de la congestión vehicular y sus efectos sobre las emisiones contaminantes en una intersección semaforizada de la ciudad. La investigación tiene como objetivo general modelar a microescala el tráfico y las emisiones vehiculares en una intersección de Ibarra mediante simuladores de tráfico y emisiones, con el fin de optimizar el tráfico y reducir las emisiones contaminantes. La metodología aplicada incluye una campaña experimental para la recopilación de datos sobre la infraestructura, flujo vehicular, características del parque automotor y configuración de señales de tráfico, utilizando cámaras ANPR y el software de simulación PTV VISSIM para microsimular el tráfico y las emisiones. Se definieron diferentes escenarios de tráfico para evaluar las variaciones en consumo de combustible y emisiones. Los resultados revelaron que, en días laborables, la flota se compone mayoritariamente por sedanes con una participación del 50%, seguido del SUV con 25%; las velocidades de aproximación y salida muestran una congestión marcada; el consumo de combustible y las emisiones de CO y NOx se concentran en la franja horaria de 12:00–13:00; la optimización semafórica con la creación de nuevos escenarios reduce la longitud de cola, consumo y emisiones, destacando el escenario E3 como el más eficiente. Finalmente, la investigación confirma la relación directa entre congestión vehicular y emisiones contaminantes, y demuestra que la modelación a microescala mediante simulación es una herramienta eficaz para identificar medidas que optimicen el tráfico y reduzcan el impacto ambiental en áreas urbanas críticas como las intersecciones.

Palabras clave: modelado a microescala, tráfico, emisiones vehiculares, intersección, simulación, gestión semafórica.

ABSTRACT

The present investigation addresses the issue of traffic congestion and its impact on pollutant emissions at a signalized intersection in the city. The main objective is to microscale model traffic and vehicular emissions at an intersection in Ibarra using traffic and emissions simulators, aiming to optimize traffic flow and reduce pollutant emissions. The applied methodology includes an experimental campaign to collect data on infrastructure, traffic flow, vehicle fleet characteristics, and traffic signal configuration, using ANPR cameras and the PTV VISSIM simulation software to microsimulate traffic and emissions. Various traffic scenarios were defined to evaluate variations in fuel consumption and emissions. The results showed that on weekdays, the fleet is mainly composed of sedans (50%), followed by SUVs (25%); approach and departure speeds indicate marked congestion; fuel consumption and CO and NO_x emissions peak between 12:00–13:00; traffic light optimization through new scenarios reduces queue length, fuel consumption, and emissions, with scenario E3 standing out as the most efficient. Ultimately, the study confirms the direct relationship between traffic congestion and pollutant emissions and demonstrates that microscale modeling through simulation is an effective tool for identifying measures to optimize traffic and reduce environmental impact in critical urban areas such as intersections.

Keywords: microscale modeling, traffic, vehicular emissions, intersection, simulation, signal management.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	17
INTRODUCCIÓN	17
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	17
1.1.1 Antecedentes	17
1.1.2 Planteamiento del Problema.....	18
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 Objetivo General	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 ALCANCE.....	21
CAPÍTULO II	22
MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 FUNDAMENTOS DE EMISIONES VEHICULARES.	22
2.1.1 Descripción de contaminantes generados por un vehículo	22
2.1.2 Formación de emisiones en motores de combustión.....	24
2.1.3 Normas de emisiones para el transporte vehicular.....	26
2.1.4 Metodología para medir emisiones.	27
2.2 FUNDAMENTOS DE TRÁFICO VEHICULAR.	27
2.2.2 Relaciones fundamentales de los parámetros de tráfico.....	29
2.2.3 Descripción de la congestión vehicular.....	31
2.2.4 Medición de flujo de tránsito.	32
2.3 FUNDAMENTOS DE MODELAMIENTO DE EMISIONES.	32
2.3.1 Modelamiento de Tráfico Vehicular.	33
2.3.2 Modelamiento de Emisiones Vehiculares.	34
2.3.3 Modelamiento vs Mediciones Reales.....	35
2.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA	35
2.4.1 Técnicas aplicadas para estimar tráfico.....	36
2.4.2 Técnicas aplicadas para estimar emisiones.	37
2.4.3 Enfoques para integración de modelos de tráfico y emisiones.	38

CAPÍTULO III	40
MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO	40
3.1.1 Variables de Infraestructura	40
3.1.2 Variables de la Flota Vehicular	41
3.1.3 Variables de Emisiones	41
3.2 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	42
3.2.1 Criterio de Selección	42
3.2.2 Área de Estudio Seleccionada	43
3.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SOFTWARE	44
3.3.1 Equipo para recolección de tráfico	45
3.3.2 Software	47
3.4 PRUEBAS PILOTO Y DEFINICIÓN DE FRANJAS HORARIAS.....	48
3.4.1 Pruebas de Registro de Datos de Tráfico.	49
3.4.2 Configuración final de los Equipos.....	50
3.4.3 Primeras Configuraciones del Software.....	51
3.4.4 Definición de Franjas Horarias.	52
3.5 CAMPAÑA EXPERIMENTAL	53
3.5.1 Características Generales de los Días de Estudio.....	53
3.6 PROCESAMIENTO DE DATOS	56
3.6.1 Preprocesamiento de Datos	56
3.6.2 Procesamiento de Datos	59
3.7 SIMULACIÓN DE TRÁFICO Y MODELADO DE EMISIONES	61
3.7.1 Simulación del tráfico	61
3.7.2 Modelamiento de Emisiones	67
3.7.3 Generación de escenarios	71
3.7.4 Posprocesamiento de datos.....	72
CAPÍTULO IV.....	80
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	80
4.1 CARACTERIZACIÓN FLOTA VEHICULAR.....	80
4.1.1 Composición de la Flota Vehicular por Escenario.....	80
4.2 INTENSIDAD DEL TRÁFICO EXPERIMENTAL	83

4.2.1	Intensidad Diaria	83
4.2.2	Intensidad Horaria por Días	85
4.2.3	Distribución Trayectorias de los Vehículos	88
4.3	ESTIMACIÓN LONGITUD DE COLA.....	89
4.3.1	Registros Día Laborable: D1. Miércoles.....	89
4.3.2	Registros Día Laborable: D2. Viernes	90
4.3.3	Registros Día No Laborable: D3. Sábado	91
4.4	VELOCIDAD PROMEDIO MODELADA.....	92
4.5	CONSUMO DE COMBUSTIBLE MODELADO	93
4.5.1	Registros Día Laborable: D1. Miércoles.....	93
4.5.2	Registros Día Laborable: D2. Viernes	94
4.5.3	Registros Día No Laborable: D3. Sábado	94
4.6	EMISIONES MODELADAS	95
4.6.1	Emisiones de CO y NO _x	95
4.6.2	Correlación entre emisiones y consumo.....	97
4.7	ESTIMACIÓN CONSUMO Y EMISIONES POR ESCENARIOS DE TRÁFICO.....	100
4.7.1	Longitud de Cola entre Escenarios.....	100
4.7.2	Consumo de Combustible por Escenario	101
4.7.3	Emisiones de NO _x por Escenario	101
4.7.4	Comparación entre escenarios.....	102
4.7.5	Mapa de Consumo de Combustible entre escenarios.....	103
4.7.6	Mapa de Emisiones NO _x entre escenarios.....	104
CAPÍTULO V		106
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		106
5.1	CONCLUSIONES.....	106
5.2	RECOMENDACIONES	108
REFERENCIAS		109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dispositivos para realizar estudios de volumen utilizando el método automático	32
Tabla 2. Variables de Infraestructura Cuantitativas	41
Tabla 3. Variables de Infraestructura Cualitativas	41
Tabla 4. Variables de la Flota Vehicular	41
Tabla 5. Variables de Emisiones	42
Tabla 6. Equipos utilizados y su función	44
Tabla 8. Características técnicas de Dahua Access ANPR Camera.....	46
Tabla 9. Variables limpieza y etiquetado de datos	59
Tabla 10. Configuraciones de los Semáforos	71
Tabla 11. Distribución Trayectorias Miércoles	88
Tabla 12. Características Trayectorias Viernes	88
Tabla 13. Características Trayectorias Sábado	89
Tabla 14. Velocidades promedio modeladas por días y horarios.....	92
Tabla 15. Comparación entre escenarios de tráfico	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de la combustión	24
Figura 2. Componentes de los gases de escape durante una combustión real	26
Figura 3. Diagrama Intensidad-Velocidad	30
Figura 4. Diagrama Intensidad-Densidad.....	30
Figura 5. Diagrama Densidad-Velocidad.....	31
Figura 6. Descripción general de la metodología.....	33
Figura 7. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación.....	40
Figura 8. Intersección utilizada en la campaña experimental	43
Figura 10. Dahua Access ANPR Camera.....	45
Figura 11. Software VISSIM	47
Figura 12. Instalación de equipos.....	48
Figura 13. Datos del tráfico capaces de registrarse adecuadamente	49
Figura 14. Diagrama de instalación de equipos	50
Figura 15. Software Vissim.....	51
Figura 16. Intensidad vehicular horaria en la intersección día sábado.....	53
Figura 17. Intensidad vehicular horaria miércoles	54
Figura 18. Intensidad vehicular horaria viernes	55
Figura 19. Intensidad vehicular horaria sábado	56
Figura 20. Proceso del procesamiento de datos	56
Figura 21. Diagrama de flujo preprocesamiento de datos.....	57
Figura 22. Descarga de datos cámara Dahua Access	58
Figura 23. Interfaz gráfica de R Studio	58
Figura 24. Diagrama de flujo procesamiento de datos.....	59
Figura 25. Extracto de código de cálculo de promedios de la composición vehicular	60
Figura 26. Extracto de código de cálculo de promedios de las rutas de vehículos	61
Figura 27. Proceso general de la simulación de tráfico y modelado de emisiones	61
Figura 28. Diagrama de flujo de simulación del tráfico.....	62
Figura 29. Interfaz Vissim para encontrar ubicación	63
Figura 30. Interfaz VISSIM para configuración de enlaces.....	63
Figura 31. Interfaz VISSIM para añadir vehículos	64
Figura 32. Interfaz VISSIM - Secciones para agregar vehículos.....	65
Figura 33. Interfaz VISSIM para composición vehicular	65

Figura 34. Interfaz VISSIM para rutas de vehículos.....	66
Figura 35. Interfaz VISSIM para ingresos de vehículos	66
Figura 36. Interfaz VISSIM para controladores de señales	67
Figura 37. Proceso general para estimación de emisiones	68
Figura 38. Interfaz VISSIM para parámetros de simulación	69
Figura 39. Interfaz VISSIM de nodos	69
Figura 40. Interfaz VISSIM de configuración de la evaluación	70
Figura 41. Interfaz VISSIM de simulación y resultados	71
Figura 42. Diagrama de flujo de posprocesamiento de datos	72
Figura 43. Extracto de código gráficas composición vehicular	73
Figura 44. Extracto de código gráficas intensidad vehicular	74
Figura 45. Extracto de código gráficas longitud de cola.....	75
Figura 46. Extracto de código gráficas consumo combustible.....	76
Figura 47. Extracto de código gráficas emisiones.....	77
Figura 48. Extracto de código gráficas correlación.....	78
Figura 49. Extracto de código mapas de emisiones	79
Figura 50. Composición flota vehicular día miércoles	81
Figura 51. Composición flota vehicular día viernes	82
Figura 52. Composición de la flota vehicular día sábado	83
Figura 53. Intensidad diaria calle Bolívar	84
Figura 54. Intensidad diaria calle Oviedo	84
Figura 55. Intensidad horaria miércoles	85
Figura 56. Intensidad horaria viernes	86
Figura 57. Intensidad horaria sábado	87
Figura 58. Intensidad horaria domingo	87
Figura 59. Longitud de cola día miércoles.....	90
Figura 60. Longitud de cola día viernes	91
Figura 61. Longitud de cola día sábado	92
Figura 62. Consumo de combustible total intersección día miércoles.....	93
Figura 63. Consumo de combustible total intersección día viernes.....	94
Figura 64. Consumo de combustible total intersección día sábado	95
Figura 65. Emisiones de CO y NO _x día miércoles.....	96
Figura 66. Emisiones de CO y NO _x día viernes.....	96

Figura 67. Emisiones de CO y NO _x día sábado	97
Figura 68. Correlación entre consumo y emisiones de NO _x	98
Figura 69. Correlación entre consumo y emisiones de CO.....	99
Figura 70. Correlación entre NO _x y CO.....	99
Figura 71. Longitud de cola por escenario	100
Figura 72. Consumo de combustible total intersección por escenario	101
Figura 73. Emisiones de CO por escenario	102
Figura 74. Comparación de resultados entre escenarios	103
Figura 75. Mapa de consumo de combustible entre escenarios	104
Figura 76. Mapa de emisiones NO _x entre escenarios.....	105

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Antecedentes

A nivel mundial ya existen múltiples modelos de emisiones que se pueden utilizar; existen trabajos previos que han desarrollado una metodología para la estimación de emisiones a microescala, utilizando modelos de microsimulación de tráfico y emisiones, donde consideran el comportamiento individual de los vehículos y sus interacciones, así como las señales de tráfico y los cambios de carril. El sistema de simulación implementado se basa en un modelo de simulación de tráfico VISSIM y un modelo de emisiones VERSIT+micro, que proporciona estimaciones detalladas de las emisiones para diferentes tipos de vehículos y condiciones de tráfico, además, los resultados se validaron utilizando datos de un laboratorio móvil en un entorno urbano real (Quaassdorff, 2018).

En los últimos años se ha reconocido un incremento de vehículos en Ecuador; se propone una solución tecnológica para la congestión vehicular utilizando una red vehicular (VANET) que permite vigilar el tráfico en horas pico en Ibarra. Mediante la simulación del tráfico vehicular con el software SUMO y la implementación de la red de comunicación con el software OMNeT++ a través de VEINS. Se establecieron dos escenarios de movilidad, con y sin VANET, demostrando que VANET puede mejorar el tráfico y la movilidad vehicular. En el escenario con VANET, más de la mitad de los vehículos mejoraron en tiempo, distancia o los dos. La red vehicular permite controlar y organizar el tráfico, proporcionando eficiencia, seguridad y confianza al conductor al informarle sobre posibles eventualidades (Marcillo, 2020).

La temporización de semáforos en Ibarra es una problemática para el tráfico vehicular, esta se podría optimizar de una mejor manera con el objetivo de mitigar problemas de congestión vehicular, consumo de combustible, emisiones de gases y economía vial. Los datos se obtuvieron con la ayuda de la Empresa Pública de Movilidad (MEP) y mediante conteos manuales, permitiendo determinar los diferentes tipos de movimientos en las intersecciones. Los resultados indican un aumento en el flujo vehicular, reducción de demoras y minimización del volumen de tráfico en las intersecciones. Además, se logró una reducción estimada en el

consumo de combustible anual de 23.681\$, representando un ahorro significativo para el GAD-Ibarra y el gobierno nacional (Realpe & Enríquez, 2018).

La contaminación ambiental derivada de los motores de combustión interna plantea desafíos significativos en Ibarra, empezando por la falta de una base de datos de emisiones. El estudio “Estimación de emisiones de vehículos automotores a través de la metodología MobiliseYourCity para la ciudad de Ibarra” aborda este problema mediante la evaluación de emisiones y la proyección de escenarios futuros utilizando datos de MOVIDELNOR. La metodología se aplicó a los datos recolectados, resultando en 102.8 Mt CO_{2eq} para 2022 en el escenario Business as Usual (BAU). Se plantearon tres escenarios futuros: aumento del uso de autobuses para 2025, optar por el transporte no motorizado para 2030 y aumentar el número de vehículos eléctricos para 2025, con márgenes de reducción del 5%, 19% y 6.55% respectivamente. El primer escenario fue considerado el ideal para Ibarra, debido a su bajo costo y capacidad para reducir la congestión vehicular (Buitrón & Trujillo, 2023).

1.1.2 Planteamiento del Problema

En la mayoría de los entornos urbanos, la contaminación ambiental se destaca como una amenaza para la salud pública, donde la movilización de vehículos es la principal causa. Las emisiones vehiculares son la principal preocupación, debido a su relación con las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y la mortalidad prematura (Rodríguez et al., 2021). Cada año, se destaca la importancia de minimizar las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero, por eso se busca diversas medidas que reduzcan el impacto negativo generado por el transporte. Las acciones son modificar los sistemas ya existentes de los vehículos y el comportamiento de los conductores para lograr una mayor eficiencia y reducir las emisiones vehiculares (Oskarbski & Biszko, 2023).

En la actualidad más de la mitad de la población reside en zonas urbanas, por lo que existe una creciente movilización urbana. Esto provoca niveles altos de congestión vehicular en ciudades de todo el mundo. En la movilización por carretera, la congestión por tráfico puede ocasionar mayores tiempos de viaje en una misma ruta o grandes incertidumbres en la velocidad del viaje. Dichos aspectos implican resultados negativos en el consumo de combustible y las emisiones vehiculares (Rosero et al., 2023).

La congestión del tráfico y los factores operativos (comportamiento del conductor, carga de pasajeros, estado de la vía, tipo de combustible, tecnología del vehículo) pueden afectar al comportamiento de las emisiones vehiculares (Rosero et al., 2023). Muchas ciudades en el mundo enfrentan el desarrollo de la economía urbana, lo que genera un rápido aumento del número de vehículos; esto tiene como consecuencia que la congestión vehicular se vuelva cada vez un problema más grave, provocando un consumo masivo de combustible y altas emisiones vehiculares (Zhao et al., 2022).

En las ciudades, las intersecciones son uno de los principales puntos de congestión vehicular y por lo tanto una de las principales emisiones contaminantes que afectan a la salud (Arciniegas, 2018). En el caso de la Ciudad Ibarra, está caracterizada por tener un alto número de intersecciones semaforizadas en su hipercentro, debido a un intensivo proceso de semaforización desarrollado en el año 2012. Esta condición, ha provocado que varias intersecciones de la ciudad muestren episodios frecuentes de altos niveles de tráfico vehicular. De ahí que el problema de la congestión y las emisiones vehiculares en las intersecciones deben ser abordados.

1.2 Justificación

En el marco del plan de creación de oportunidades para el periodo 2021-2025, se establece como duodécimo objetivo, el promover modelos de desarrollo sostenibles a través de la implementación de medidas de adaptación y mitigación al Cambio Climático. De manera más específica, en la política 12.2, apartado F2, se detalla los límites territoriales que contemplan la implementación de esquemas para la gestión integral de pasivos ambientales y emisiones atmosféricas contaminantes considerando tanto las zonas urbanas y rurales (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

De acuerdo con este objetivo, el presente estudio tiene como propósito analizar los factores de emisiones generados por la congestión vehicular en una intersección de la ciudad de Ibarra. Algunas investigaciones anteriores, como la referenciada en (Heni et al., 2024), han determinado que la congestión del tráfico y otros factores de operación son factores que pueden afectar significativamente el comportamiento de las emisiones en las zonas urbanas.

La congestión vehicular representa una problemática mundial que genera consecuencias económicas, sociales y ambientales. Desde una perspectiva económica, implica un incremento

en los tiempos de viaje y, por ende, en los costos asociados al transporte. A nivel social, se convierte en una disminución en la calidad de vida de los habitantes. Ambientalmente, conlleva a un incremento en las emisiones de gases contaminantes (Bogaerts et al., 2020).

La contaminación por emisiones vehiculares representa un problema de salud pública. Medio millón de muertes por cáncer pulmonar y 1.6 millones de muertes debido a enfermedad pulmonar obstructiva crónica son atribuibles directamente a la exposición a contaminantes vehiculares. También afecta otros sistemas dentro del cuerpo, lo que resulta en enfermedades cardiovasculares, diabetes, obesidad, alergias; incluso, se ha observado un impacto en el funcionamiento cognitivo (Jäntti et al., 2024).

Para llevar a cabo este trabajo de investigación, se empleará dos simuladores, uno para simulación de tráfico y otro para simulación de emisiones. Según la investigación de (Raju & Farah, 2021), los simuladores SUMO y Vissim son los más utilizados en los últimos años debido a su eficiencia, facilidad de acceso y uso. Estos simuladores nos ayudan a obtener perfiles cinemáticos de los vehículos en diferentes posiciones y a simular diferentes escenarios para gestionar el tráfico de mejor y garantizar una mejor movilidad y una menor congestión.

Los resultados obtenidos en el simulador de tráfico serán utilizados como datos para el simulador de emisiones, mismo que nos entregará datos para evaluar las emisiones en la intersección en diferentes escenarios. Estos resultados nos permitirán realizar un análisis de las emisiones generadas en una intersección por influencia de la congestión vehicular (Tarapues, 2019).

Este estudio de investigación nos permitirá estimar el nivel de emisiones en escenarios críticos de congestión vehicular, proporcionando información que permitan diseñar políticas orientadas en la optimización de la movilización y la reducción de contaminación vehicular para la protección de la salud y el cumplimiento del duodécimo objetivo del plan de creación de oportunidades para el periodo 2021-2025 (Hasan et al., 2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Modelar a microescala el tráfico y las emisiones vehiculares en una intersección de la ciudad de Ibarra mediante la utilización de un simulador de tráfico y emisiones vehiculares.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de los fundamentos de las emisiones vehiculares, el tráfico y congestión en la carretera, y el modelamiento a microescala de emisiones vehiculares por tráfico.
- Recopilar datos sobre el tráfico, las características del parque vehicular y la configuración de las señales de tráfico en una intersección de la ciudad de Ibarra.
- Modelar a microescala las emisiones vehiculares en una intersección de la ciudad empleando un simulador de tráfico y emisiones vehiculares.
- Evaluar las emisiones vehiculares estimadas en la intersección para diferentes escenarios de tráfico vehicular.

1.4 Alcance

El presente estudio se enfoca en analizar el tráfico y las emisiones vehiculares generadas en una intersección de la ciudad de Ibarra. En general, este estudio será desarrollado en cinco fases. En primer lugar, se llevará a cabo una selección de una intersección de la ciudad de Ibarra donde exista episodios frecuentes de congestión vehicular. En segundo lugar, se seleccionará una metodología para medir la intensidad vehicular y las características del parque automotor. En tercer lugar, se realizará una campaña experimental en la intersección aplicando la metodología seleccionada. Esta campaña se llevará a cabo en días laborales y fines de semana. En cuarto lugar, los datos obtenidos serán usados como datos de entrada en un simulador de tráfico para modelar el tráfico y estimar las emisiones de los vehículos que circulan por la intersección estudiada. En la última etapa, se analizarán las emisiones obtenidas en la etapa previa con el propósito de proponer mejoras en la configuración de la intersección.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de Emisiones Vehiculares.

Las emisiones generadas por los vehículos son de las principales fuentes de contaminación ambiental urbana (Kumar et al., 2021). El uso de combustibles fósiles como fuente de energía de los automóviles incrementa la presencia de contaminación atmosférica, debido a que la combustión de estos genera diversos tipos de emisiones como Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Azufre (SO_x), Material Particulado (PM), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), gases de efecto invernadero como Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), entre otros (Viteri et al., 2023). Estas emisiones contaminantes se producen debido a una combustión incompleta (Lee et al., 2021).

2.1.1 Descripción de contaminantes generados por un vehículo

El proceso de combustión en los motores libera diversos contaminantes atmosféricos que afectan la salud y el medio ambiente (Vega, 2015). La formación de estas emisiones contaminantes depende del tipo de combustible, la relación aire-combustible y las condiciones de operación del motor (Velepucha & Sabando, 2021). Comprender su origen, comportamiento y consecuencias permite diseñar estrategias para reducir su creación y mitigar sus impactos negativos (Rocha et al., 2018).

2.1.1.1 Óxidos de Nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno son uno de los contaminantes más problemáticos producidos por la combustión (Lee et al., 2021). Las emisiones de NO_x consisten principalmente en óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). A menudo, la emisión de NO₂ es significativamente menor que la de NO (Ortolani et al., 2024). Su formación en la combustión puede deberse a diversos factores como la temperatura, la relación aire-combustible, la concentración de oxígeno (Lee et al., 2021). El NO_x inmediato se forma en la parte delantera de la llama cuando se enriquece la mezcla aire-combustible con ausencia de oxígeno (Sayyed et al., 2023).

2.1.1.2 Monóxido de Carbono.

El monóxido de carbono es un gas venenoso que carece de olor, color y sabor, por lo que es indetectable para los sentidos humanos. Este gas es producido por la combustión incompleta de

combustibles (Moberg et al., 2023). Y es la materia más nociva que se encuentra en las emisiones de gases de escape (Sayyed et al., 2023). Comparado con el CO₂, la toxicidad del CO es mayor, generando una preocupación pública por los impactos negativos a la salud. A medida que disminuye la concentración de oxígeno, las mezclas ricas en combustible producen una combustión incompleta, disminuyendo la probabilidad de que el CO se transforme en CO₂, aumentando su concentración (Lee et al., 2021).

2.1.1.3 Dióxido de Carbono.

En los últimos años, diversos estudios han señalado que los vehículos con motores de combustión interna generan cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂), contribuyendo a la contaminación ambiental (Meo et al., 2024). Estas emisiones de CO₂ son cruciales en el calentamiento global, siendo responsables de más de la mitad del aumento del efecto invernadero a nivel mundial (Yan et al., 2024). Además, existe una relación directa entre las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible: cuanto mayor es el consumo, mayores son las emisiones de dióxido de carbono (Sayyed et al., 2023).

2.1.1.4 Hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos que consisten principalmente en carbono e hidrógeno. Sus emisiones se deben principalmente a un retardo del encendido muy largo, una baja relación de aire-combustible y una baja temperatura de combustión (Lee et al., 2021). Además, las emisiones de HC aumentan debido a la baja temperatura del gas en el cilindro en los momentos tardíos de la postinyección (Wang et al., 2022). Estas emisiones de HC en el arranque en frío son un obstáculo para los objetivos de emisiones de los vehículos y la carrera hacia las emisiones de impacto cero (Moses-DeBusk et al., 2023).

2.1.1.5 Material Particulado.

El material particulado (PM) es uno de los contaminantes más comunes y se caracteriza por la presencia de partículas diminutas procedentes de diversas fuentes, como las emisiones de los vehículos (Kozziel et al., 2024). El PM es una mezcla de partículas en fase sólida y gotas de líquido en el aire. Algunas PM son notablemente grandes y oscuras como para observarse a simple vista en forma de hollín o humo (Lee et al., 2021). Estas partículas pueden cuantificarse

como partículas finas, es decir, $PM_{2,5}$ con un diámetro inferior a $2,5 \mu m$, y como partículas gruesas, es decir, PM_{10} que poseen un diámetro entre $2,5$ y $10 \mu m$ (Lala et al., 2024).

2.1.2 Formación de emisiones en motores de combustión

Los vehículos generan emisiones contaminantes, por influencia de varios factores como el tipo de combustible utilizado, el estilo de conducción, la tecnología del motor, el relieve y las condiciones climáticas en las que se opera el motor de combustión interna (Arroyo et al., 2021). Para poder entender la formación de las emisiones de un motor de combustión interna, es necesario conocer el proceso de combustión en un motor. La combustión es una reacción química que necesita de tres factores representados en el triángulo de la combustión; el combustible básicamente está compuesto por Carbono (C) e Hidrógeno (H), por otro lado, el comburente es el oxígeno, pero en la práctica se utiliza aire como comburente, y la energía de activación es una chispa eléctrica que desencadena la reacción de combustión (R. García, 2001).

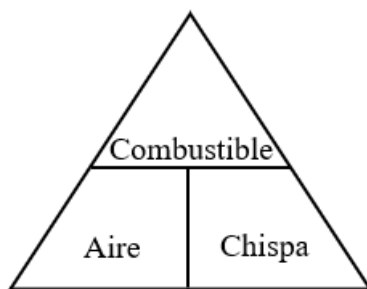
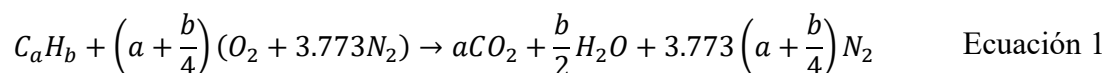
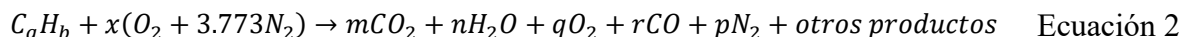


Figura 1. Triángulo de la combustión
(Autoría Propia)

Existen dos tipos de combustiones: la combustión ideal y la combustión real. La combustión ideal es aquella donde la mezcla aire combustible debería quemarse completamente como se muestra en la Ecuación 1 y que genera emisiones no tóxicas como CO_2 , vapor de agua (H_2O) y nitrógeno (N_2) (Korakianitis et al., 2011).



Sin embargo, la combustión real de un motor, que no es idealmente estequiométrica, genera contaminantes como el CO , HC Y NO_x . Esta combustión incompleta se da cuando el oxígeno no es suficiente para oxidar todos los elementos del combustible y se lo puede representar mediante la Ecuación 2 (Palomares, s/f).



2.1.2.1 Combustión en Motores de Encendido Provocado.

Los Motores de Encendido Provocado (MEP) pueden emplear diferentes combustibles, ya sean líquido (gasolina) o gaseoso (hidrógeno, gas natural) (W. León & Morocho, 2012). La combustión en los MEP se basa en la ignición de una mezcla compuesta entre aire y combustible previamente mezclada y homogénea en estado gaseoso. La combustión se inicia previo a que el pistón alcance el Punto Muerto Superior (PMS) durante la fase de compresión gracias a un aporte de energía (la chispa). Esta chispa inicia las reacciones químicas de la combustión que se propagan con velocidad por la cámara de combustión (Muñoz & Rovira, 2015).

Las principales emisiones generadas en un MEP son: óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos (P. León & Piña, 2018). Algunos factores como el octanaje del combustible y la altura tienen un efecto significativo en las emisiones de CO y HC. Por otro lado, las revoluciones del motor y la altura influyen en las emisiones de CO₂. De igual manera, cuanto más rica sea la mezcla, mayor será la emisión de CO y con un combustible de mayor octanaje las emisiones de HC disminuyen de forma considerable (Arroyo et al., 2021).

2.1.2.2 Combustión en Motores de Encendido por Compresión.

Los Motores de Encendido por Compresión (MEC) utilizan varios tipos de combustible, caracterizados por una mayor eficiencia térmica y por ser económico para las aplicaciones que tiene. De igual manera, estos combustibles son menos volátiles, más viscosos y con un peso específico superior a los combustibles empleados en los motores de encendido provocado y se los denominan combustibles pesados (Yolanda et al., 2014). Los combustibles empleados en estos motores son diésel, biodiésel, diésel de azufre ultra bajo, diésel de grados, entre otros (Aguayza & Quintuña, 2020).

La combustión en los MEC es una combustión dada por la autoignición del combustible. A diferencia de los MEP, en la fase de admisión se introduce únicamente aire en el cilindro y en un punto cercano al final de la compresión, se empieza la inyección del combustible. El inicio de la combustión viene provocado por la autoinflamación del combustible inyectado, esto debido a que la temperatura que posee el aire es suficiente para autoencender el combustible.

La inyección del combustible se realiza a presión elevada en función a la presión existente en el cilindro y la necesidad de pulverizar el combustible (Muñoz & Rovira, 2015).

En vehículos diésel, las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) suelen ser menos notables. Sin embargo, a mayor altitud las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) se vuelven representativas (Arroyo et al., 2021). El nivel bajo en las emisiones de CO y HC es gracias a los convertidores catalíticos. Sin embargo, la preocupación persiste en relación con la emisión de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en los vehículos equipados con motores diésel (Soca, 2021). En la **Figura 2** se evidencia la diferencia en el porcentaje en peso de las emisiones de la combustión real de los motores diésel y los motores a gasolina.

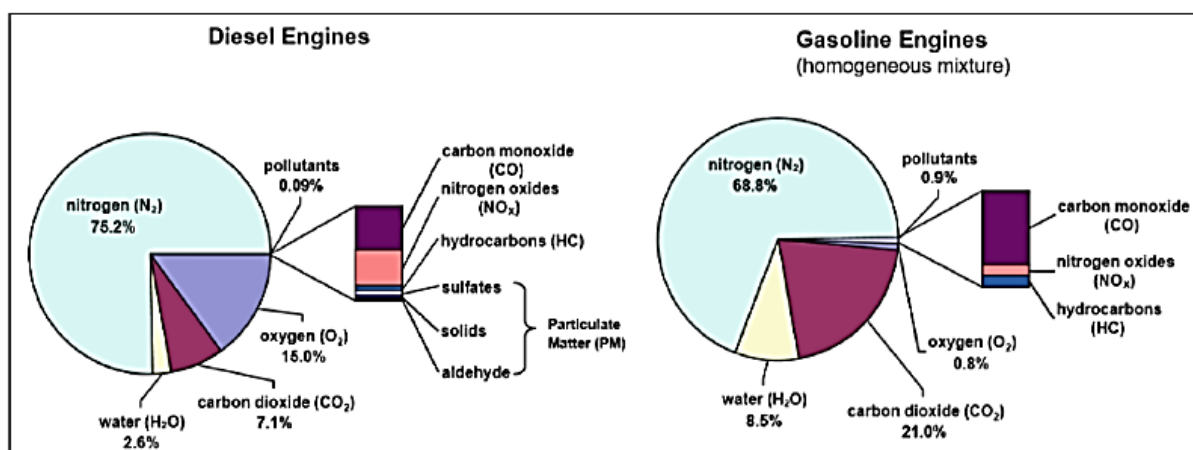


Figura 2. Componentes de los gases de escape durante una combustión real (Soca, 2021)

2.1.3 Normas de emisiones para el transporte vehicular.

A partir de 1950 en Los Ángeles, se incrementó la compra de vehículos privados, y las emisiones generadas por los automóviles fueron una importante contribución para la contaminación urbana. Debido a este suceso, se decidió establecer estándares de emisiones de gases de escape para los nuevos automóviles, siendo la primera vez en 1968. Estos estándares se actualizan de manera constante, siendo más estrictos cada vez. Los países que han tenido una importante aportación en la legislación del control de emisiones han sido Estados Unidos y la Unión Europea. La ONU ha exigido que el resto de los países adopten normas exigentes con respecto a las emisiones generadas por los vehículos (Gerardo et al., 2019).

En el Ecuador existen dos normas que explican los métodos de ensayo para emisiones y son las normas NTE INEN 2202 y NTE INEN 2203; la norma NTE INEN 2202 establece el método de ensayo para determinar el porcentaje de opacidad de las emisiones de escape de las fuentes

móviles con motor de diésel mediante el método de aceleración libre (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a), y la NTE INEN 2203 establece el método de ensayo para determinar la concentración de las emisiones provenientes del sistema de escape de vehículos equipados con motor de encendido por chispa en condiciones de marcha mínima o “ralentí” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013b). De igual manera las normas mencionadas anteriormente se apoyan de las normas NTE INEN 2204 y la NTE INEN 2207, mismas que establecen los límites autorizados de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores), siendo la NTE INEN 2204 para motores a gasolina y la NTE INEN 2207 para motores a diésel (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017).

2.1.4 Metodología para medir emisiones.

Las emisiones generadas por los vehículos pueden analizarse y medirse tanto en condiciones controladas de laboratorio como en situaciones del mundo real. En el laboratorio se utiliza una prueba de dinamómetro de chasis para medir las emisiones de vehículos de manera individual bajo diferentes condiciones de conducción simuladas. Por otro lado, se lleva a cabo un estudio de túnel de carretera para describir las emisiones de los vehículos en condiciones reales, incluyendo las emisiones de escape como las que no provienen del escape (Ho et al., 2023). Además, existe otro método práctico para medir las emisiones de vehículos en situaciones reales: la prueba a bordo. Este ensayo proporciona datos más realistas y precisos para cada región utilizando la tecnología PEMS (sistema portátil de medición de emisiones) para recopilar la información. El PEMS incluye analizadores de gases portátiles, GPS, caudalímetros, controladores y un sistema de Diagnóstico A Bordo (DAB) para evaluar los niveles de emisiones contaminantes de los vehículos utilizados en las pruebas (Frutuoso et al., 2023).

2.2 Fundamentos de Tráfico Vehicular.

Las características primordiales del flujo vehicular se describen mediante tres variables principales: el flujo, la velocidad y la densidad. Al establecer relaciones entre estas variables, podemos determinar las propiedades de la corriente de tráfico y predecir las consecuencias de diversas opciones de operación o proyectos viales. Además, estas tres variables pueden expresarse en términos de otras, conocidas como variables asociadas, que incluyen el volumen, el intervalo, el espaciamiento, la distancia y el tiempo (Mozo, 2011).

En los modelos matemáticos las variables varían según el enfoque utilizado. En los modelos macroscópicos, no se consideran las características específicas de los vehículos y, por su comportamiento estadístico, las variables principales como el tamaño de los vehículos y la distancia entre ellos, se promedian. Por otro lado, en los modelos microscópicos se tienen en cuenta las diferentes variables que especifican las características individuales de cada vehículo, además de las reglas de movimiento individual de cada uno (F. Pérez et al., 2014).

2.2.1.1 Flujo vehicular.

El flujo vehicular representa la circulación de los vehículos en cualquier vía, permitiendo determinar la eficiencia de su operación. Este término se refiere a la frecuencia con la que los vehículos pasan por un punto o una sección transversal de un carril. La tasa de flujo se expresa mediante la Ecuación 3, donde el número de vehículos (N), que atraviesan durante un intervalo de tiempo (T), se mide en vehículos por minuto (veh/min) o vehículos por segundo (veh/s) (Cal & Cárdenas, 2018). Por su parte, Gibson lo define como el número de vehículos que cruzan una sección específica de la vía en una unidad de tiempo (Sarango & Díaz, s/f).

$$q = \frac{N}{T} \quad \text{Ecuación 3}$$

2.2.1.2 Velocidad.

La velocidad constante es la relación entre el espacio recorrido por un vehículo durante un intervalo de tiempo, como se muestra en la Ecuación 4. En el estudio de flujo vehicular, dos tipos de velocidad son especialmente relevantes. La velocidad media temporal es la media aritmética de las velocidades puntuales de todos los vehículos que pasan por un punto específico de una carretera durante un intervalo de tiempo seleccionado, como se muestra en la Ecuación 5. Y la velocidad media espacial es la media aritmética de las velocidades instantáneas que, en un instante dado se encuentran en un tramo de carretera, como se muestra en la Ecuación 6 (Cal & Cárdenas, 2018).

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\bar{v}_e = \frac{\sum_{j=1}^m v_j}{m} \quad \text{Ecuación 6}$$

2.2.1.3 Densidad.

La densidad es el número de vehículos (N) que ocupan una longitud específica (d) de una vía en un instante dado como se muestra en la Ecuación 7. Se mide en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea refiriéndose a un carril o a todos los carriles de una calzada (Cal & Cárdenas, 2018). Es posiblemente el parámetro más importante en el tránsito, ya que está relacionada con la demanda de tránsito (Mozo, 2012). Sin embargo, medirla es muy compleja y requiere dispositivos costosos y ubicaciones específicas para fotografiar o grabar en longitudes significativas (Sarango & Díaz, 2020).

$$k = \frac{N}{d} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.2.2 Relaciones fundamentales de los parámetros de tráfico.

Entre los parámetros fundamentales del tráfico vehicular que han sido descritos previamente, existen relaciones que nos permiten derivar una de ellas, en base a los valores de las otras. De esta forma la relación fundamental entre la intensidad, la densidad y la velocidad media espacial viene dada por la Ecuación 8 (Maldonado et al., s/f).

$$q = k \cdot \bar{v}_e \quad \text{Ecuación 8}$$

Se puede relacionar las variables descritas previamente emparejándolas. La relación intensidad-velocidad es la más importante para describir el funcionamiento del tráfico de una vía, debido a que considera la demanda de tráfico y la calidad de circulación. En la **Figura 3** se muestra un diagrama de esta relación donde se puede observar que existen altas velocidades de circulación al haber un bajo flujo de vehículos, pero si el flujo va aumentando hasta un máximo de intensidad la circulación se vuelve inestable y más lenta (A. Pérez et al., 2018).

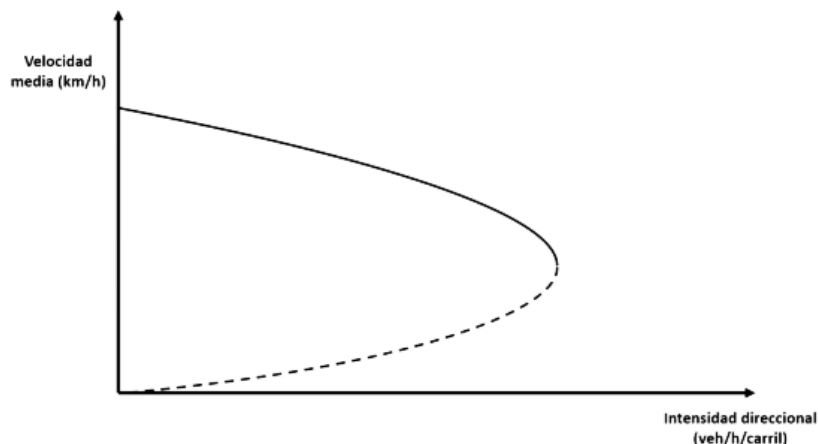


Figura 3. Diagrama Intensidad-Velocidad
(A. Pérez et al., 2018)

También está la relación intensidad-densidad que puede derivarse de la anterior relación mediante la ecuación fundamental del tráfico. El gráfico correspondiente a esta relación se muestra en la **Figura 4**. La rama superior de la curva (discontinua) hace referencia a una situación de congestión, mientras que la rama inferior (continua) representa una circulación estable (A. Pérez et al., 2018).

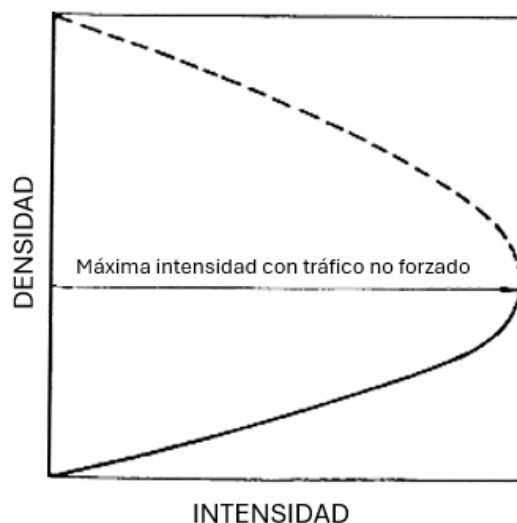


Figura 4. Diagrama Intensidad-Densidad
(A. Pérez et al., 2018)

Por último, tenemos la relación densidad-velocidad que de igual manera se puede obtener de la relación anterior a través de la ecuación fundamental del tráfico. En la **Figura 5** se puede observar el diagrama correspondiente a esta relación, en este gráfico se puede observar una parte superior de la curva (continua) que representa una circulación estable y una parte inferior (discontinua) que hace referencia a una situación de congestión (A. Pérez et al., 2018).

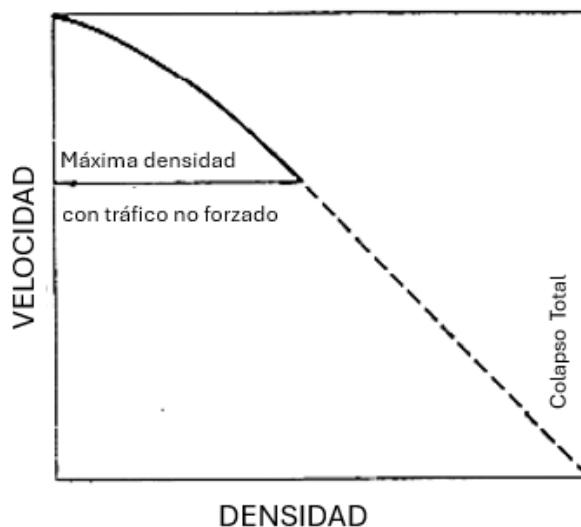


Figura 5. Diagrama Densidad-Velocidad
(A. Pérez et al., 2018)

2.2.3 Descripción de la congestión vehicular.

La congestión vehicular se refiere a la condición en la que muchos vehículos circulan, pero cada uno avanza lenta e irregularmente (Thomson & Bull, 2001). También se define como la reducción de la velocidad del tráfico por debajo de los límites de diseño o velocidad establecidos. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la ingeniería de tráfico y la planificación urbana, con un enfoque especial en cuestiones ambientales y la contaminación del aire (Kan et al., 2024). Para evaluar el nivel de congestión se han desarrollado diversas medidas, considerando diferentes criterios de actuación. Estas medidas se pueden clasificar en cinco categorías: velocidad, tiempo de viaje, retraso, nivel de servicio (LoS) e índices de congestión (Sun et al., 2024).

Ciertamente, la congestión del tráfico representa uno de los mayores obstáculos para el desarrollo de ciudades sostenibles, con consecuencias adversas significativas tanto a nivel social como económico (Ahmed Alkaissi, 2024). Durante los periodos de congestión, los motores en ralentí contribuyen al aumento del consumo de combustible y a una menor eficiencia en el uso de este. A su vez, esto resulta en emisiones más elevadas (Pang et al., 2023). Estas emisiones no solo afectan al ambiente, sino también a la salud pública, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Ahmed Alkaissi, 2024).

2.2.4 Medición de flujo de tránsito.

Existen algunos métodos para medir el estado del tráfico que pueden ser manuales o electrónicos, pero todos basan su principio en el conteo. El aforo manual se lo hace a través de personas, también llamadas aforadores de tránsito y son usados cuando la información no puede ser obtenida mediante dispositivos mecánicos. Este método permite obtener información de la clasificación de vehículos, el movimiento direccional en una intersección o entrada, uso por carril y/o longitud de colas, dirección del recorrido, entre otros (Villarroel & Vildoso, 2015).

Los conteos electrónicos se realizan mediante contadores operados eléctricamente. Estos pueden clasificarse en dos tipos principales: fijos y portátiles. Los contadores fijos se utilizan para conteos continuos en estaciones de control de peaje o en puntos específicos de una vía. Están instalados permanentemente y registran el flujo vehicular a lo largo del tiempo. Los contadores portátiles se usan para periodos cortos como estudios específicos o eventos temporales. Se instalan temporalmente y se retiran después de recopilar los datos (Sanchez, s/f). En la **Tabla 1** se presentan algunos de los dispositivos de conteo y sus características.

Tabla 1. Dispositivos para realizar estudios de volumen utilizando el método automático

Método	Conteo	Velocidad	Clasificación	Múltiples carriles
Circuitos inductores	X	X	X	
Magnetómetros	X	X		
Radar de microondas	X	X	X	X
Infrarrojo activo	X	X	X	X
Infrarrojo pasivo	X	X		
Ultrasonido	X	X		
Acústicos	X	X		X
Procesamiento de imágenes	X	X	X	X

(Sisalima, 2018)

2.3 Fundamentos de Modelamiento de Emisiones.

En los últimos años, diversos estudios han buscado simular las emisiones del tráfico mediante la integración de modelos de tráfico y emisiones. En estas investigaciones, las intersecciones de carreteras señalizadas se han identificado como puntos críticos de contaminación en entornos urbanos. Esto debido a que la exposición de las personas a la contaminación del aire relacionada con el tráfico tiende a ser mayor que el promedio en estos lugares. Ya que la aceleración, desaceleración y el ralenti de los vehículos ocurren con mayor frecuencia en dichos microambientes (Xu et al., 2018).

En la **Figura 6** se presenta una metodología para poder realizar una estimación de emisiones mediante el modelado de tráfico y emisiones vehiculares. Se puede observar cuales son los datos necesarios para ingresar en los simuladores. A su vez podemos observar como la simulación del tráfico vehicular sirve como datos de entrada en la simulación de emisiones vehiculares. En este proceso, es fundamental contar con datos sobre las características del flujo vehicular, que ya hemos descrito previamente, para comprender y modelar las emisiones generadas por los vehículos.

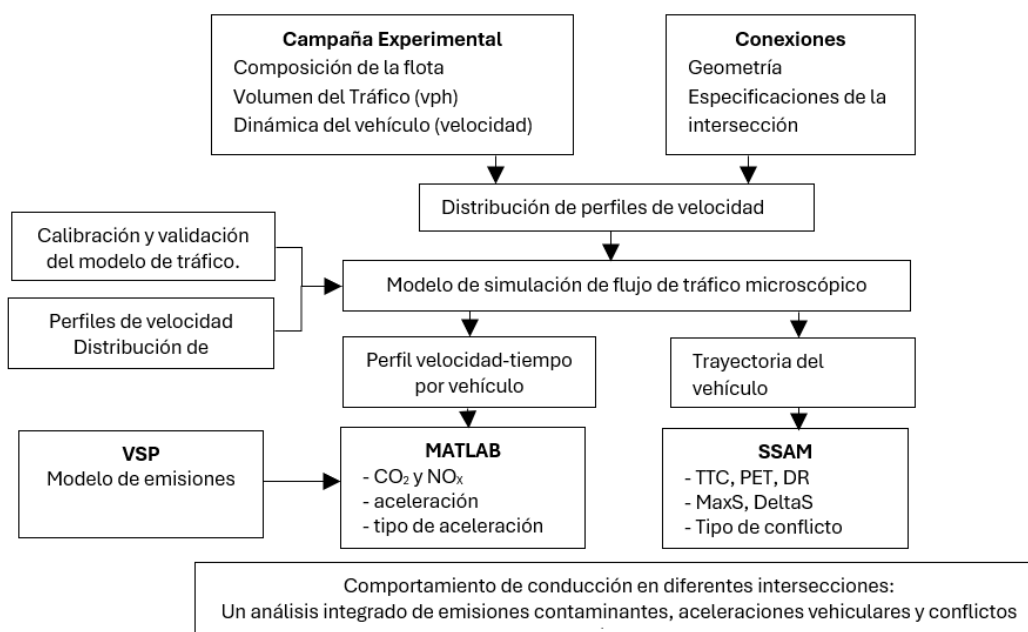


Figura 6. Descripción general de la metodología (Bahmankhah et al., 2022)

2.3.1 Modelamiento de Tráfico Vehicular.

Los modelos matemáticos han sido una herramienta para comprender la conducta de algunos fenómenos de la naturaleza y la sociedad y el estudio del flujo del tráfico no es una excepción. En 1930 se plantearon los primeros modelos matemáticos para describir y entender el comportamiento del flujo del tráfico. A partir de ese momento, se han desarrollado diferentes técnicas y modelos para estudiar este tema. Para el flujo del tráfico se divide en tres modelos fundamentales: el Modelo Macroscópico, el Modelo Mesoscópico o Cinético y el Modelo Microscópico (Ruiz & Tineo, 2019).

El modelo macroscópico se utiliza para describir el flujo de tráfico, considerando variables como la densidad, la velocidad promedio y la capacidad de la vía. Es muy útil para analizar

grandes áreas y planificar infraestructuras viales. Por otro lado, los modelos mesoscópicos pertenecen a la categoría de métodos estocásticos y representan un vínculo entre la cinética microscópica y macroscópica. En estos modelos se estudian las interacciones entre grupos de vehículos, teniendo en cuenta aspectos como la formación de corrientes de tráfico y las transiciones entre flujos libres y congestionados (Waldeer, 2003).

Los modelos microscópicos se basan en autómatas celulares y, por lo tanto, necesitan soluciones de simulaciones por ordenador (Waldeer, 2003). Estos modelos se centran en las interacciones individuales entre vehículos y con su entorno, aquí se analiza el comportamiento de cada automóvil en función de su posición, velocidad y aceleración. Se trata de un modelo a tiempo continuo en el que los modelos matemáticos comenzaron siendo movimientos lineales y, posteriormente, se desarrollaron ecuaciones diferenciales de primer y segundo orden (Ruiz & Tineo, 2019).

Uno de los modelos populares y relativamente sencillos para explicar el flujo vehicular es el Modelo de Autómatas Celulares (MAC). Este modelo de tiempo y espacio de fase discreto permite programar simulaciones computacionales para describir el flujo vehicular. Además, para que la modelación matemática se ajuste mejor a la realidad, existe una regla conocida como “inicio lento” (en inglés *slow-to-star rule*). Inicialmente, se propuso para modelar el flujo en una vía que se incorpora a una autopista donde los vehículos reducen la velocidad al punto de casi detenerse y luego comenzar a aumentarla progresivamente (Ruiz & Tineo, 2019).

2.3.2 Modelamiento de Emisiones Vehiculares.

Para estimar y predecir el impacto ambiental causado por los flujos de tráfico vehicular, se han desarrollado modelos específicos. En general, estos modelos permiten cuantificar las cantidades de contaminantes emitidos al aire a través del conocimiento del estado del tráfico que incluye el volumen y composición de tráfico, así como la velocidad y aceleración de los vehículos. Debido a la variedad de modelos de emisiones de tráfico disponibles, los investigadores deben elegir el modelo más adecuado según el propósito de su aplicación (Pasquale et al., 2019).

Dependiendo de la precisión con la que se quiere estimar las emisiones, estos modelos se pueden clasificar en microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos. Los modelos microscópicos (CMEM, MEASURE, VT-micro y VERSIT+) requieren información precisa y detallada sobre la dinámica de los vehículos y el entorno de la carretera. Mientras tanto, los

modelos macroscópicos (MOBILE, COPERT, VT-macro y VERSIT+) se basan en datos menos detallados como la velocidad y aceleración promedio de los vehículos. Los modelos mesoscópicos sirven como conector entre los modelos microscópicos y los macroscópicos (Pasquale et al., 2019).

Los algoritmos de los modelos antes mencionados siguen una metodología de top-down o bottom-up. Usando la metodología de top-down, se pueden estimar las emisiones anuales para toda la región, mientras que usando la metodología de bottom-up, las emisiones por hora se pueden estimar considerando las carreteras individuales como fuentes lineales separadas (Kawsar et al., 2024).

2.3.3 Modelamiento vs Mediciones Reales.

Un estudio realizado en Toronto, Canadá, revela que los resultados de la simulación de tráfico son consistentes con los recuentos manuales. De igual manera, las velocidades de los vehículos simuladas se compararon con los datos de un radar e indicaron que se logró una mejora en las velocidades del modelo con respecto a las velocidades del radar cuando el parámetro de distribución de velocidad deseado se ajustó a un rango de 50 a 65 km/h. En este mismo estudio los resultados de emisiones derivados de los datos del radar fueron significativamente más bajos que los resultados derivados de las velocidades simuladas (Xu et al., 2018).

Existe una gran confianza en los modelos y simuladores de tráfico y emisiones, hasta el punto de que diferentes países los utilizan para estimar las emisiones y crear políticas para reducir la contaminación. A modo de ejemplo, en México, el simulador SUMO permitió definir el cambio en las emisiones y el gasto energético cuando aumenta el flujo vehicular (PUEC, 2022). Además, en España, todos los escenarios de emisión se han calculado utilizando el modelo de emisiones de alta resolución HERMESv3, combinado con datos oficiales de actividad y emisiones reportados por el MITERD para reducir así la inconsistencia entre emisiones modeladas y las reportadas por mediciones reales (Guevara et al., 2022).

2.4 Revisión de la literatura

Por último, se realiza una revisión del estado del arte, donde se investiga proyectos previos que han realizado un trabajo similar al presente estudio, esto ayuda a comprender y entender el punto de vista de otros investigadores y cuál ha sido el proceso que ellos han empleado para

realizar su trabajo de investigación, así como los inconvenientes que se les ha presentado y la manera en la que solucionaron.

2.4.1 Técnicas aplicadas para estimar tráfico.

En un estudio utilizan PARAMICS como simulador de tráfico agregando un componente intermedio del modelo para mejorar las estimaciones de las velocidades del flujo de tráfico en los enlaces de carretera. Los resultados de la evaluación muestran que el método de estimación de tráfico propuesto funciona mejor que el simulador sin complementos y proporciona datos mejorados sobre la velocidad del enlace que se pueden utilizar para proporcionar mejores estimaciones del flujo vehicular dependientes del tiempo (Nesamani et al., 2007).

En otra investigación, utilizan el paquete SUMO para la estimación del tráfico, pero lo hacen a través de diferentes enfoques. El primer enfoque experimentó utilizando la búsqueda de cuadrícula para detectar velocidad, posición y coordenadas de los vehículos. El segundo enfoque utilizó la optimización metaheurística de los parámetros para un enfoque multiobjetivo. Ambos enfoques muestran resultados prometedores para optimizar el modelo de regresión ajustando los parámetros; sin embargo, los algoritmos metaheurísticos mostraron mejores resultados que el enfoque de búsqueda de cuadrícula (Qaddoura et al., 2024).

En otra ocasión utilizan el modelo VANET como una herramienta de estimación del tráfico, pero implementando una ecuación desarrollada por los autores para modelar y analizar la influencia de esta a la hora de decisiones adaptativas. Y los resultados de la simulación demuestran que la integración de la ecuación mejora el rendimiento del modelo VANET en términos de hasta un 50% en varios escenarios en densidades de los vehículos altas, medias y bajas (Martin et al., 2024).

Por otro lado, un estudio modeló el retraso de vehículos y peatones para cruces peatonales señalizados a mitad de cuadra en condiciones de tráfico mixto. Para los datos sobre las características del flujo de peatones y vehículos se registraron mediante una técnica videográfica y las características del tráfico mixto y otras condiciones del campo se simularon en la herramienta de micro simulación Vissim. Las características del flujo de tránsito fueron calibradas y validadas utilizando la estadística GEH, lo que arrojó un error del 13% en la estimación de los retrasos de peatones y vehículos, volviendo la simulación menos eficiente (Manthirikul et al., 2023).

También se realizó una revisión exhaustiva de estudios internacionales y aplicaciones prácticas relacionadas con el uso del software PTV VISSIM. Los resultados señalan que este software ha demostrado ser una herramienta potente para simular condiciones de tráfico heterogéneas, y los investigadores confían en este modelo para generar datos esenciales y evaluar la efectividad de sus enfoques en diversas circunstancias. Sin embargo, se podría lograr un rendimiento mejorado integrando algoritmos de optimización o modelos de IA (Al-Msari et al., 2024).

2.4.2 Técnicas aplicadas para estimar emisiones.

En un estudio previo, se utiliza el modelo MOVES, que es un modelo de emisiones de fuentes móviles que se basa en la potencia específica del vehículo haciéndolo adecuado para usarlo en todo el mundo. Según el análisis de resultados y la información de antecedentes de otros estudios, la aplicación del modelo MOVES existe un acertado resultado de la tasa de emisiones siempre y cuando se apliquen bien los ciclos de conducción locales y específicos de los vehículos. Sin embargo, estos ciclos se basan en datos limitados de la actividad del vehículo y para tener resultados más confiables, se debe utilizar datos más extensos (Perugu, 2019).

En otra investigación se analizó la aplicación del programa informático del modelo europeo de emisiones del tráfico por carretera COPERT 5.5 para Bangladesh. Con este programa, se calculó la producción anual de CO₂ de diferentes clases de vehículos en Bangladesh de 2016 a 2020, y se utilizaron estimaciones de datos del Banco Mundial como punto de referencia. Los resultados de este estudio sugieren que el software de emisiones COPERT 5.5 tiene resultados válidos que permiten proponer factores de emisión y el desarrolló de inventarios de emisiones vehiculares en todo el país (Kawsar et al., 2024).

Por otro lado, un estudio propone el desarrollo de un inventario de alta resolución de emisiones vehiculares en Ecuador utilizando el sistema de modelación IVE. Los datos requeridos fueron recolectados en varias provincias del país. Y los resultados del estudio mostraron que las zonas más críticas se encuentran en las ciudades de Quito y Guayaquil a partir de las 6:00 h, 12:00 h y 18:00 h en las que se produce el mayor número de emisiones. Además, se descubrió que los camiones fueron los que generaron mayores emisiones de contaminantes atmosféricos (Viteri et al., 2023).

En otra investigación se desarrollaron modelos de emisiones en tiempo real utilizando el tiempo de avance de los vehículos como variable explicativa. Para investigar el factor de emisión

instantánea de CO de los vehículos, se aplicó como herramienta de estudio el modelo VT-Micro para calcular el factor de emisión instantánea de CO de vehículos individuales utilizando la velocidad y la aceleración del vehículo como entradas. El análisis de resultados muestra que, con un intervalo de tiempo más bajo, se produce un aumento del factor de emisión de CO con la disminución del intervalo de tiempo (Elkafoury et al., 2015).

Por último, una investigación examinó las diferencias en las emisiones de CO₂ obtenidas con diferentes métodos dentro de una red de cañones callejeros, donde se llevó a cabo una campaña de laboratorio móvil para cuantificar las emisiones del tráfico. Se comparó tres métodos top-down basados en la resistencia aerodinámica (MOST1, MOST2 y BHT) y tres modelos bottom-up basados en la actividad (NGM, HBEFAv4.2 y PHEMlight). La combinación del modelo MOST1 y NGM conduce a la diferencia más pequeña y al coeficiente de correlación más alto entre el resto. Por lo tanto, los resultados destacan la importancia de elegir un modelo adecuado para el cálculo de las emisiones de CO₂ (Fung et al., 2023).

2.4.3 Enfoques para integración de modelos de tráfico y emisiones.

En una investigación se realizó un microanálisis del comportamiento de conducción en los conflictos de tráfico y las emisiones contaminantes. La simulación de las operaciones de tráfico se hizo con el modelo de tráfico VISSIM y en cuanto a las emisiones, se utilizó el método Vehicle Specific Power (VSP) para estimar el CO₂ y NO_x generados por los vehículos. Se desarrolló una rutina específica de MATLAB para integrar la dinámica del vehículo y los datos de trayectoria de VISSIM con el modelo VSP y estimar las emisiones contaminantes sin ningún inconveniente (Bahmankhah et al., 2022).

Por otro lado, una tesista doctoral emplea el modelo de simulación del flujo de tráfico a microescala VISSIM para obtener resultados detallados de emisiones de tráfico y utilizarlos como entrada para un modelo de emisiones a microescala VERSIT+micro y de esa manera obtener estimaciones de las emisiones de NO_x y PM₁₀. Para validar estos resultados se compararon con resultados obtenidos con un modelo de emisiones a mesoescala COPERT 4 como referencia a nivel europeo. El estudio indica que para estimaciones precisas es importante una definición detallada de la composición de la flota de vehículos (Quaassdorff, 2018).

También en un trabajo de grado se combina modelos de tráfico y modelos de emisiones a escala micro y macro, e incluyen una interfaz para pasar de una escala a otra. En la tesis explica que

los modelos de tráfico generan datos de tráfico como la intensidad, capacidad, velocidad media y tiempos de viaje. Esta información permite que el modelo de emisiones calcule los factores de emisiones para cada categoría de vehículo. Este estudio demuestra que esto se puede realizar a escala micro y macroscópica siempre y cuando los datos que se ingresa en el modelo de tráfico sean lo más acertados posible (F. Pérez, 2017).

En otra tesis doctoral, explica que la modelización de emisiones es un ejercicio multidisciplinario que combina los resultados de un modelado de tráfico con modelos de emisiones. Sin embargo, es una tarea compleja, ya que existen algunas diferencias en la definición de variables que son relevantes para la modelización de emisiones. Y aunque los datos de tráfico se puedan utilizar como entrada en el modelado de emisiones, no siempre se basan en las mismas definiciones. Se identificó varios modelos de emisiones y difieren en los diferentes aspectos de las emisiones de los vehículos (Smit, 2007).

Y para finalizar, en otra tesis doctoral, a través de una herramienta de micro simulación de tráfico y mediante los datos recogidos en la campaña de vehículos flotantes, se calibró el modelo, tanto el escenario base como el ajuste de parámetros de conducción para simular la conducción eficiente. A continuación, calculan las emisiones de CO₂ and NO_x mediante un modelo de emisiones a nivel microscópico. En este estudio usan la herramienta (PTV Vissim) tanto para el modela de tráfico como para el de emisiones (Á. García, 2016).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología de investigación, los equipos y software utilizados para modelar el tráfico y las emisiones a microescala. También se describen las consideraciones aplicadas durante la campaña experimental y los procedimientos para procesar los datos recopilados. La **Figura 7** muestra el flujo de las actividades principales realizadas a lo largo del estudio y sirve como guía para la estructura del capítulo.

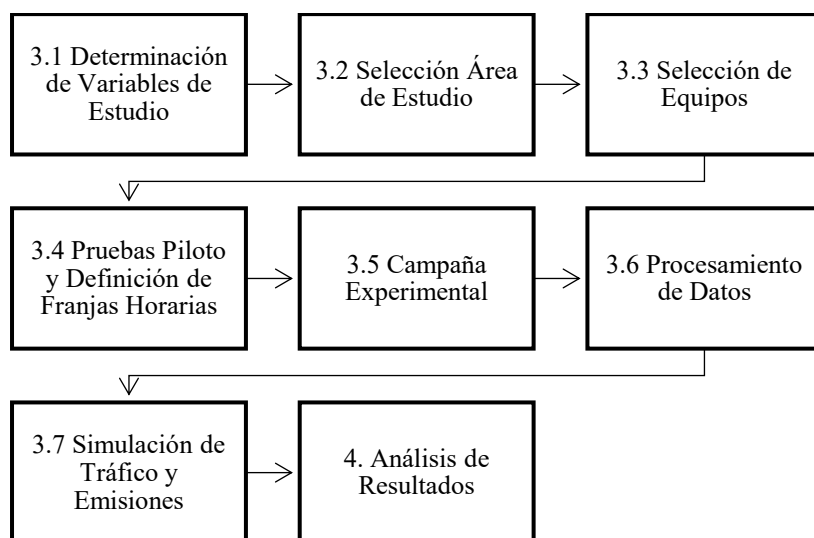


Figura 7. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación
(Autoría Propia)

3.1 Determinación de Variables de Estudio

Para modelar el tráfico y las emisiones en una intersección a escala microscópica, se seleccionaron variables de tres tipos diferentes: infraestructura, flota vehicular y emisiones. Cada grupo de variables permitió el modelado a microescala del tráfico y las emisiones en una intersección de la ciudad de Ibarra. A continuación, se describen dichas variables.

3.1.1 Variables de Infraestructura

Las primeras variables que se definieron en este estudio fueron las de infraestructura, estas se dividieron en dos tipos: cuantitativas y cualitativas. Las variables cuantitativas de la infraestructura se utilizaron para describir la geometría de la red vial donde se va a realizar la campaña experimental. Dichas variables, juntamente con su unidad de medida, se detallan a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Variables de Infraestructura Cuantitativas

Variable	Unidad
Carriles	u
Ancho	m
Cambio de dirección	%
Fase de los semáforos	s

(Autoría Propia)

Por otro lado, el otro tipo de variables de la infraestructura que se pudieron identificar y utilizar en el presente estudio son las cualitativas, estas variables permitieron describir con mayor detalle la geometría de la infraestructura y facilitaron la comprensión del comportamiento de los vehículos en el área de estudio o intersección. Estas variables y su criterio por tomar en cuenta se describen en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Variables de Infraestructura Cualitativas

Variable	Criterio
Dirección	Es el sentido en el que se mueven los vehículos
Posición de los semáforos	Ubicación de los semáforos
Enlaces	Carreteras direccionales
Conectores	Giros posibles entre enlaces

(Autoría Propia)

3.1.2 Variables de la Flota Vehicular

En segundo lugar, se definieron las variables de la flota vehicular, mismas que se muestran en la **Tabla 4**. Estas permitieron detallar las características de los vehículos que transitan por el área de estudio, siendo otros datos de entrada complementarios para el simulador que se utilizará. Estas variables deben registrarse con una frecuencia de muestreo de al menos 1 Hz para captar variaciones instantáneas.

Tabla 4. Variables de la Flota Vehicular

Variable	Unidad
Tipo de vehículo	%
Intensidad	veh/h
Velocidad máxima	km/h

(Autoría Propia)

3.1.3 Variables de Emisiones

En último lugar se buscó un enfoque en las emisiones generadas en el área de estudio. Estas emisiones se consideran como las variables de emisiones y los parámetros de cada una de ellas

se muestran a continuación en la **Tabla 5**; estos valores dependen de las variables de la infraestructura y de la flota vehicular, por lo que se consideran como datos de salida.

Tabla 5. Variables de Emisiones

Variable	Unidad
Emisiones de CO	gCO
Emisiones de NO _x	gNO _x
Emisiones de VOC	gVOC

(Autoría Propia)

3.2 Selección del Área de Estudio

Para el cumplimiento de la presente investigación, fue indispensable seleccionar el área de estudio donde se registraron las variables de infraestructura y variables de la flota vehicular. Además, es necesario que el área seleccionada cumpla con ciertos requisitos que permita cumplir con el objetivo general del presente trabajo. En las siguientes secciones se detallan los criterios a tomar en cuenta para seleccionar el área de estudio, y el área de estudio seleccionada.

3.2.1 Criterio de Selección

Actualmente, más de la mitad de la población vive en zonas urbanas, lo que ha incrementado la movilidad y generado altos niveles de congestión vehicular; este hecho acompañado del rápido incremento del parque automotor en Ecuador se ha convertido en un problema crítico. En la ciudad de Ibarra, el hipocentro se establece como punto de referencia urbano para delimitar el área de estudio, abarcando las parroquias con mayor concentración de población y centros educativos; entre ellas destacan El Sagrario y San Francisco, caracterizadas por su elevada densidad de habitantes y la presencia significativa de instituciones académicas.

Las intersecciones urbanas son uno de los puntos críticos de congestión vehicular, lo que incrementa significativamente la emisión de gases contaminantes. De acuerdo con el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de 2023 correspondiente a la ciudad de Ibarra (Potosí, 2023), las áreas con mayor nivel de tráfico son los accesos a establecimientos educativos, donde la entrada y salida de estudiantes genera una alta demanda vehicular. Así mismo, se observa una notable congestión en los accesos a instituciones públicas estatales y entidades financieras. Este problema se ve agravado por prácticas inadecuadas como el doble estacionamiento, que obstaculiza la circulación y empeora el impacto del tránsito urbano.

Por los motivos previamente mencionados, el área de estudio seleccionada debía encontrarse en la zona urbana de la ciudad de Ibarra, preferiblemente en el hipercentro, y que se ubique cerca de un establecimiento educativo, público estatal o entidad financiera; de igual manera, contar con semaforización y que exista antecedentes de problemas de doble estacionamiento.

3.2.2 Área de Estudio Seleccionada

El área de estudio utilizada en la presente investigación corresponde a una intersección semaforizada en el hipercentro de la ciudad de Ibarra tal como se muestra en la **Figura 8**, esta área se encuentra ubicada junto a la Prefectura de Imbabura, una institución pública estatal de gran relevancia, a escasos metros de la Mutualista Imbabura, entidad financiera de alta concurrencia. Así mismo, la intersección está rodeada de diversos puntos de interés público, como una sala de velaciones, el supermercado Santa María y otros locales comerciales y administrativos. Aproximadamente a 100 metros de distancia se localiza la institución educativa Inmaculada Concepción, que contribuye a una movilidad urbana compleja en la zona.

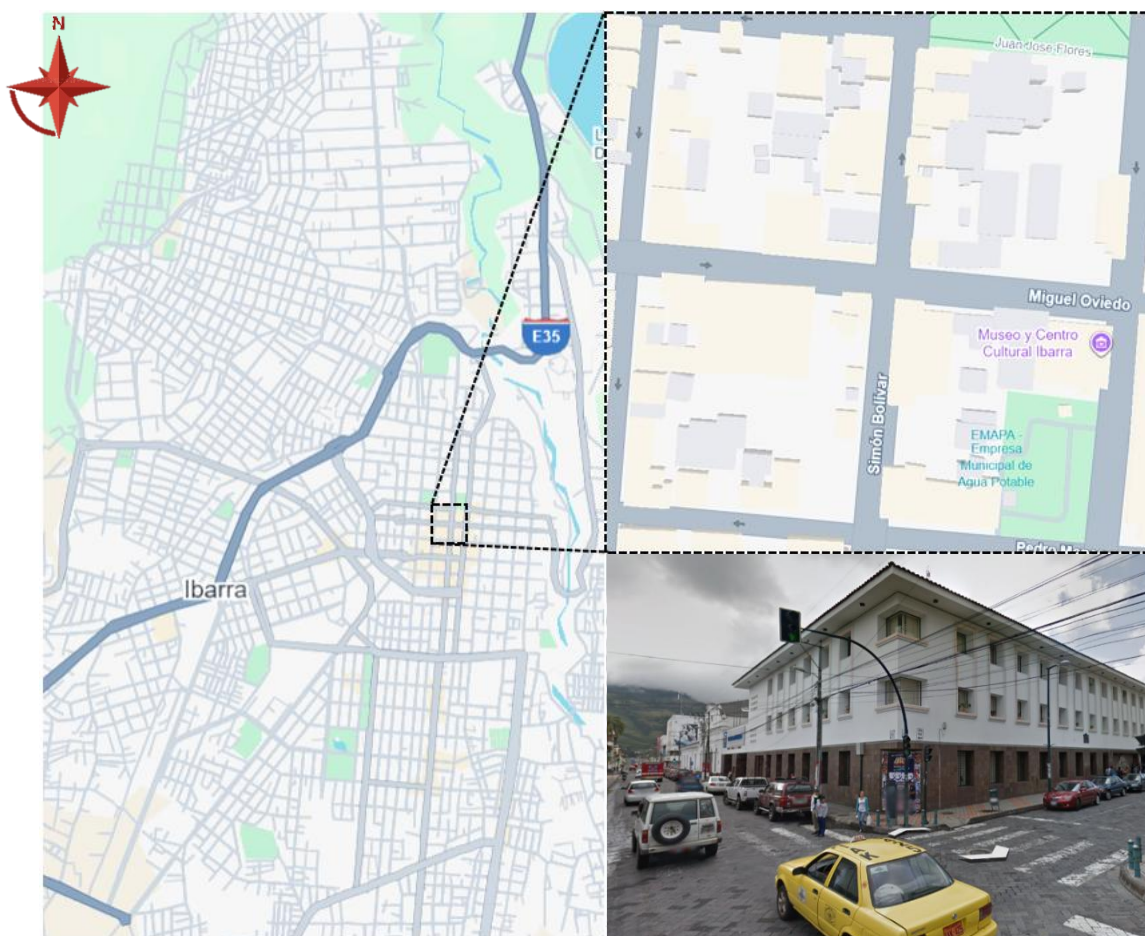


Figura 8. Intersección utilizada en la campaña experimental
(Autoría Propia)

Las características observadas en la **Figura 8**, permitieron identificar a esta intersección, situada en la unión de las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo, como un punto estratégico para el estudio de la congestión vehicular y el análisis de las emisiones generadas por el tráfico. La combinación de su ubicación en el hipercentro, la multiplicidad de actividades en sus alrededores y la presencia de un dispositivo de control de tráfico, la convirtieron en un escenario representativo para evaluar el impacto del tránsito en el entorno urbano.

3.3 Selección de Equipos y Software

La selección de los equipos debía asegurar y garantizar el registro tanto de las variables de infraestructura como de las relacionadas con la flota vehicular seleccionada. Los equipos registradores de datos necesitaban cumplir con requisitos técnicos específicos: registrar las variables de estudio seleccionadas con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, ser fácilmente configurables, operar de forma sincronizada e instalarse de manera no intrusiva en el área de estudio.

En función de estos criterios, se seleccionaron: dos registradores de datos, dos equipos de medición y un software para realizar las pruebas iniciales y la campaña experimental. Los registradores elegidos fueron dos Dahua Access ANPR Camera, mientras que los equipos de medición, utilizados para obtener las variables de la infraestructura, fueron un flexómetro para obtener las medidas de la red vial y un cronómetro para obtener las fases de los semáforos; y el software utilizado para realizar el modelado de tráfico y emisiones fue VISSIM. En la **Tabla 6** se presenta un resumen de los equipos utilizados, mientras que en las siguientes secciones se presentan los detalles de cada uno de ellos.

Tabla 6. Equipos utilizados y su función

Tipo de Variable	Equipo	Función
VARIABLES Flota Vehicular	Dahua Access ANPR Camera	Obtener datos del tráfico y la composición de la flota vehicular
VARIABLES Flota Vehicular y Emisiones	VISSIM	Modelar el tráfico y las emisiones del área de estudio

(Autoría Propia)

Para las variables de infraestructura no se utilizó equipos sofisticados o complejos, la información de las variables cualitativas como la cantidad de carriles, el sentido de la vía y la posición de los semáforos se pudo recolectar de manera visual. Mientras que las variables cuantitativas se recolectaron con equipos simples como un flexómetro para el ancho de los

carriles y un cronómetro para las fases de los semáforos. De igual manera, para una de las variables de la flota vehicular se recopiló los datos de manera manual, esta variable es la trayectoria que toman los vehículos; es decir, en la esquina seleccionada se contabilizó la cantidad de vehículos que seguían un camino recto y los que cambiaban su dirección y tomaban la otra vía, esto se realizó al mismo tiempo y en los mismos horarios que se realizaba la campaña experimental.

3.3.1 Equipo para recolección de tráfico

Para la recolección de datos de la flota vehicular se buscó un equipo que realice el conteo de manera automática, a la vez que identifique el tipo de vehículo. Para cumplir con estos requisitos la mejor opción fue una cámara que tenga integrado un sistema de reconocimiento de vehículos para poder medir la intensidad vehicular y la composición de la flota vehicular. El equipo utilizado en el presente estudio y sus características se detallan a continuación.

3.3.1.1 Cámara de Flujo de Tráfico DHI-ITC413-PW4D-IZ1.

La cámara de Flujo de Tráfico Dahua Access ANPR Camera presentada en la **Figura 9**, es una cámara de reconocimiento automático de matrículas; también es un equipo que ayuda en la automatización del proceso de recolección de datos del flujo vehicular y de la composición de la flota, este dispositivo permite grabar información del número de vehículos que pasan por la intersección, al igual que características como tipo, marca y color de los vehículos.



Figura 9. Dahua Access ANPR Camera
(Dahua Technology, 2025)

Todos los datos extraídos por la cámara son almacenados en una memoria externa para su posterior extracción y procesamiento; de igual manera las características técnicas relevantes de este equipo para el presente estudio juntamente con su descripción se encuentran presentadas en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Características técnicas de Dahua Access ANPR Camera

Característica	Descripción
Resolución de Imagen	2688 x 1520
Velocidad de Obturación	Auto/Manual 1/25 s–1/100,000 s
Electrónica	
Max. Velocidad de Detección	80 km/h
Sistema de Escaneo	Escaneo progresivo
Iluminación Inteligente	De acuerdo con el brillo del entorno, la cámara ajusta automáticamente la intensidad de su luz para revelar los detalles de los objetivos en movimiento.
Reducción de Ruido	3D NR
Almacenamiento	Puerto de tarjeta TF built-in. Admite Kingston 16 G, 32 G, 128 G, 256 G; Dahua card 16 G, 32 G, 128 G, 256 G; SanDisk 16 G, 32 G, 128 G, 256 G
Número Máximo de Vehículos Pasados	10.000
Reconocimiento de IA	Reconoce los tipos de vehículos, señales de vehículos, color del vehículo, placa del vehículo, placa, vehículo sin placa.
Reconocimiento de Tipo de Vehículo	Reconoce 10 tipos de vehículos: Autobús Grande, Camión Pesado, Camión Medio, Sedán, Furgoneta, Camión Ligero, Autobús Medio, SUV, MPV, Recogida
Protección	IK10; IP67
Temperatura de Funcionamiento	–30 °C a +65 °C (–22 °F a +149 °F)

(Dahua Technology, 2025)

Estas cámaras tenían un precio de 450 dólares por unidad, además, no se necesitaba de un procesador de video para el almacenamiento de la información, únicamente se requería una tarjeta de memoria para instalar en la cámara que tenía un costo de 30 dólares por unidad. Incluyendo el costo de instalación y configuración de los equipos que era de 350 dólares; para esta opción se precisaba un presupuesto de 1310 dólares. Cabe destacar que estas cámaras tenían una disponibilidad inmediata y cumplía con los requerimientos necesarios para poder realizar el presente estudio de investigación.

3.3.2 Software

Como se describió en la Sección 2.4, existen múltiples opciones para poder modelar el tráfico y las emisiones; sin embargo, realizando la investigación se observó que una de las opciones podía realizar las dos funciones. Esa opción es PTV Vissim, mismo que se muestra en la **Figura 10**, éste es un software de simulación multimodal del tráfico en ciudades que permite modelar el tráfico y las emisiones a nivel microscópico; como también analizar la interacción entre los diferentes elementos del tránsito. A partir de este programa se obtienen resultados de la cinemática de los vehículos, características del tráfico y emisiones generadas.



Figura 10. Software VISSIM
(PTV Group, 2025)

Este software tiene características muy completas para realizar un estudio y a continuación se detallan algunas de ellas. En primer lugar, ofrece diferentes niveles de simulación: microsimulación para un mayor nivel de detalle, mesosimulación para un proceso más eficiente y simular regiones más grandes en menor tiempo, como también simulación híbrida que combina las dos simulaciones antes mencionadas (PTV Group, 2025). Otra característica importante es el control inteligente del transporte, en el cual se puede crear un modelo con los nodos y corredores de la ciudad; en esta función el programa traza un mapa de todos los usuarios de las vías y de sus secuencias de movimientos e interacciones individuales, logrando una gestión que permite evitar atascos y reducir emisiones (PTV Group, 2025).

Por último, una de las características más importantes para este estudio es la modelización de emisiones. PTV se ha asociado con Bosch para poder proporcionar resultados precisos de emisiones de las simulaciones del tráfico que se realicen. El software calcula los resultados de las emisiones con la eficaz plataforma para calidad del aire basada en la nube de Bosch, misma que ha sido desarrollada a partir de datos exhaustivos de tráfico y de los vehículos específicos de cada país (PTV Group, 2025).

3.4 Pruebas Piloto y Definición de Franjas Horarias

Para las pruebas preliminares se instaló los equipos que recopilaban los datos sobre el flujo vehicular como se muestra en la **Figura 11** y se comprobó su correcta conexión para lograr una transmisión adecuada de los datos. Así mismo, se validaron los datos obtenidos por los equipos realizando a la par un conteo manual de los vehículos para comparar los resultados. Este procedimiento resultó esencial para aprobar el registro de datos durante la campaña experimental y el posterior procesamiento de la información recolectada.



Figura 11. Instalación de equipos
(Autoría Propia)

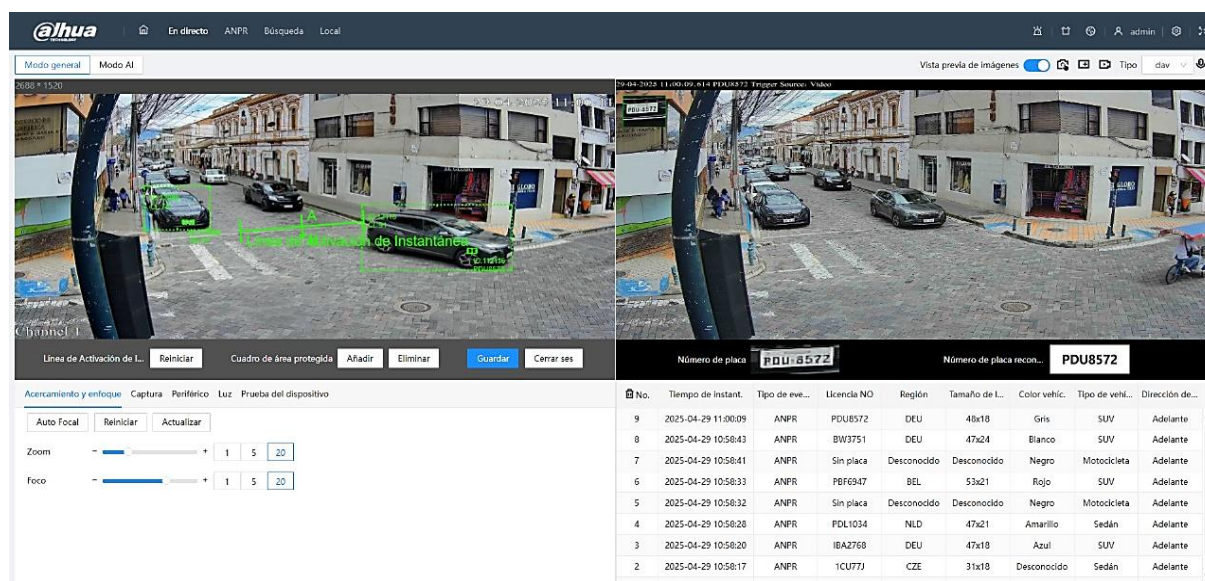
Al concluir las pruebas piloto, los equipos quedaron correctamente instalados y las configuraciones de éstos debidamente establecidas, asegurando su funcionamiento óptimo bajo las condiciones específicas del estudio. Seguidamente, se describen las pruebas realizadas para el registro de datos de tráfico, la configuración final de los equipos, las primeras configuraciones del software y la definición de las zonas horarias.

3.4.1 Pruebas de Registro de Datos de Tráfico.

En primer lugar, se determinó los datos de operación del tráfico que la Dahua Access ANPR Camera fue capaz de registrar adecuadamente a través de su sistema integrado. Con ello, se configuró el software y se validó los datos obtenidos durante los días de prueba. Sin embargo, existió un inconveniente con la red interna de la Gobernación de Imbabura que determinó un cambio en la configuración de las IPs de las cámaras. Tanto el inconveniente como la nueva configuración se detallan a continuación.

3.4.1.1 Configuración de las cámaras.

El software que permitió la recolección de datos del tráfico es una aplicación integrada de las cámaras Dahua Access ANPR que se conectó mediante red Ethernet, éste lo podemos observar a continuación en la **Figura 12**. El sistema viene incluido con las cámaras y se configuró de acuerdo con lo que se necesitó registrar en la campaña experimental.



The screenshot displays the Dahua ANPR software interface. At the top, there's a navigation bar with 'En directo', 'ANPR', 'Búsqueda', and 'Local'. Below that, there are tabs for 'Modo general' and 'Modo AI'. The main area is split into two panels: a live camera feed on the left and a data table on the right. The camera feed shows a street scene with green bounding boxes around vehicles and a red line indicating the 'Línea de Activación de L...'. The data table below the camera feed lists detected vehicles with columns for 'No.', 'Tiempo de instant.', 'Tipo de eve...', 'Licencia NO', 'Región', 'Tamaño de L...', 'Color vehic.', 'Tipo de vehi...', and 'Dirección de...'. The table contains 9 rows of data.

No.	Tiempo de instant.	Tipo de eve...	Licencia NO	Región	Tamaño de L...	Color vehic.	Tipo de vehi...	Dirección de...
9	2025-04-29 11:00:09	ANPR	PDU8572	DEU	48x18	Gris	SUV	Adelante
8	2025-04-29 10:58:43	ANPR	BW3751	DEU	47x24	Bianco	SUV	Adelante
7	2025-04-29 10:58:41	ANPR	Sin placa	Desconocido	Desconocido	Negro	Motocicleta	Adelante
6	2025-04-29 10:58:33	ANPR	PBF6947	BEL	53x21	Rojo	SUV	Adelante
5	2025-04-29 10:58:32	ANPR	Sin placa	Desconocido	Desconocido	Negro	Motocicleta	Adelante
4	2025-04-29 10:58:28	ANPR	PDL1034	NLD	47x21	Amarillo	Sedán	Adelante
3	2025-04-29 10:58:20	ANPR	IBA2768	DEU	47x18	Azul	SUV	Adelante
2	2025-04-29 10:58:17	ANPR	1CU77J	CZE	31x18	Desconocido	Sedán	Adelante

Figura 12. Datos del tráfico capaces de registrarse adecuadamente (Autoría Propia)

Por otro lado, se estableció los requerimientos necesarios para la recolección de datos del tráfico, que son las variables de la flota vehicular previamente descritos en la **Tabla 4**. Incluso, se fijó una frecuencia de muestreo de 1 Hz, a pesar de que no es necesario ya que la cámara se encuentra configurada para identificar todos los vehículos que transitan por el área seleccionada para el estudio.

3.4.1.2 Inconvenientes por Cambio en la Configuración de IP.

Al instalar las cámaras, éstas generan su propia IP; sin embargo, el lugar donde fueron instaladas cuenta con un bloqueador de IPs desconocidas, mismo que terminó inhibiendo los dispositivos. Por este motivo, era necesario alterar los siguientes parámetros: dirección IP, máscara subred, enlace puerta, servidor DNS preferido y DNS alternativo; por lo que fue necesario cambiarlos con datos internos del sistema, para que las cámaras queden correctamente integradas y funcionen sin inconvenientes.

3.4.2 Configuración final de los Equipos

La configuración final de los equipos utilizados en la campaña experimental del presente estudio se muestra en la **Figura 13**. Cabe mencionar que esta acción se definió tras la realización de las pruebas preliminares y tomando como referencia las configuraciones e inconvenientes previamente mencionados.

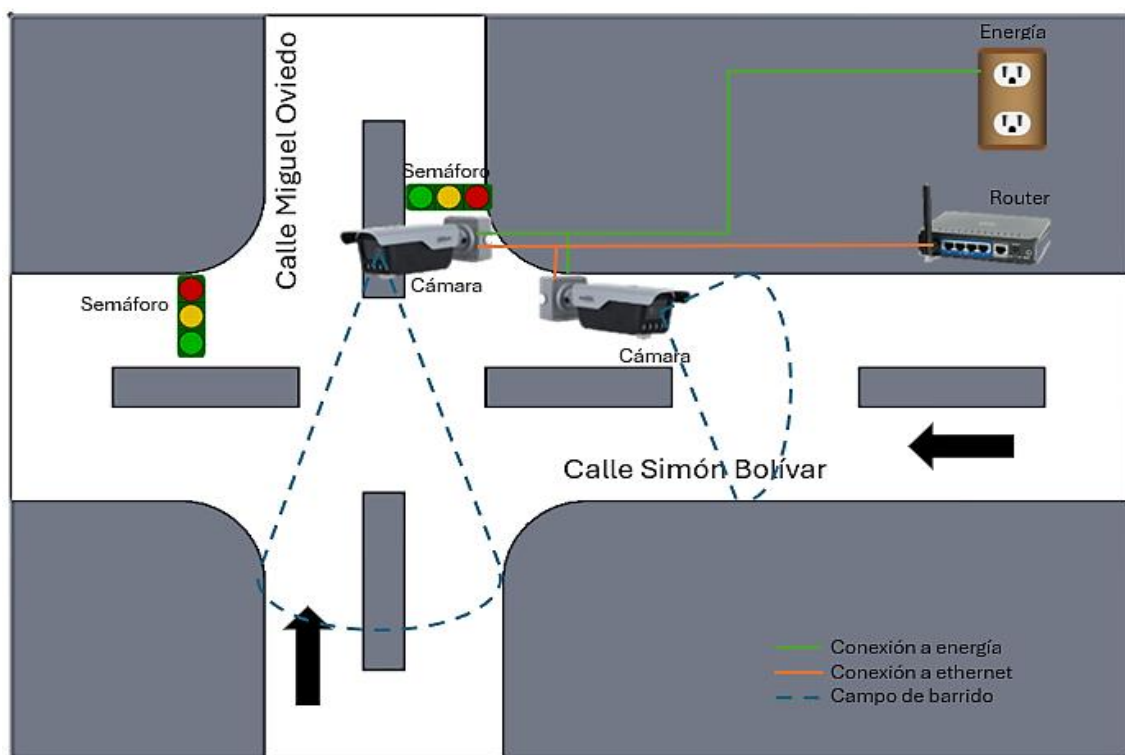


Figura 13. Diagrama de instalación de equipos
(Autoría Propia)

3.4.3 Primeras Configuraciones del Software

Una vez realizada la primera etapa de prueba para la recolección de datos, se procedió a efectuar el primer ejercicio en el software que se utilizará para simular el tráfico y modelar las emisiones. En este software que se muestra en la **Figura 14**, al crear un nuevo archivo, lo primero que se hizo, fue buscar la ubicación del lugar donde se está llevando a cabo el estudio, para poder realizar el dibujo o croquis de la simulación.

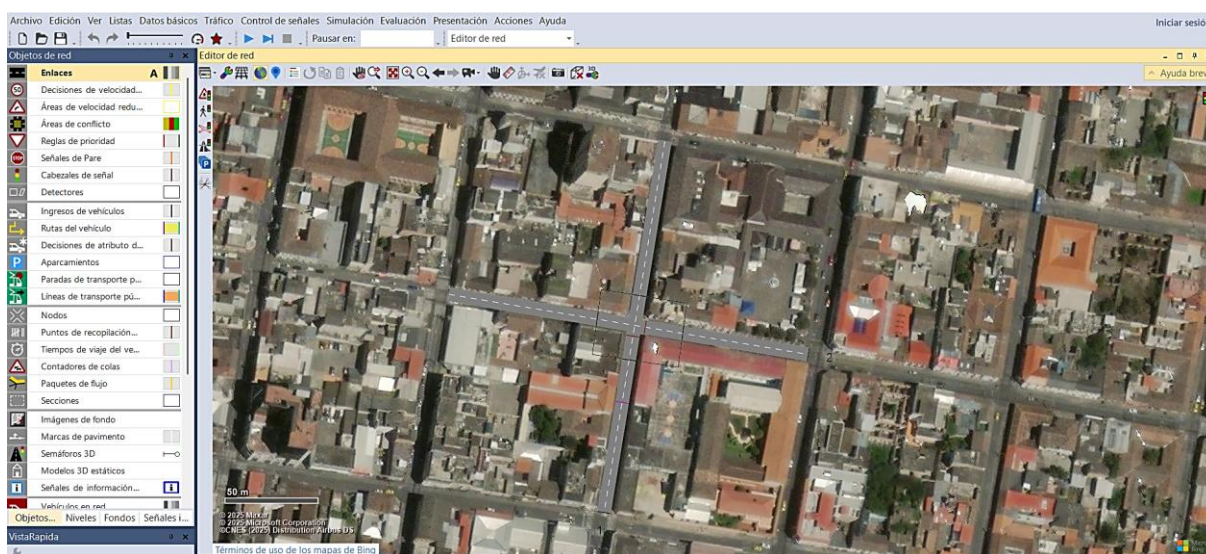


Figura 14. Software Vissim
(Autoría Propia)

Una vez dibujado los enlaces, se continúa con la configuración de los parámetros del tráfico como son: cabezas de señal (semáforos), tipos de vehículos, composición vehicular, volumen de vehículos por intervalo de tiempo. Así como otros parámetros de la infraestructura como son áreas de conflicto, nodos, dirección y sentido de las vías, y algunas características de comportamiento como son velocidad de la carretera, ruta de los vehículos, entre otras que serán detalladas más adelante.

Para esta primera simulación se utilizó la versión de estudiante, que, a pesar de tener algunas limitaciones, es bastante útil para este proyecto, debido a que permite configurar una gran parte de los parámetros de tráfico y a su vez emite resultados de las emisiones generadas. Este primer ejercicio ayudó a entender y comprender el funcionamiento del software, así como también conocer y descubrir los parámetros necesarios para realizar la simulación del tráfico y el modelado de emisiones.

3.4.4 Definición de Franjas Horarias.

A la par que se realizó el primer ejercicio de simulación, los primeros registros de datos del tráfico ya se encontraban recopilando. Estos registros se compilaron de una semana completa para poder dimensionar la cantidad de vehículos que circulaban por el área de estudio, de igual manera, estos datos permitieron definir las horas donde existe una mayor afluencia vehicular. Para realizar este proceso, se extrajo la información de las dos cámaras de conteo vehicular previamente instaladas, se procesó los datos y mediante histogramas, se definió tres escenarios para tres días distintos de la semana.

En base a la cantidad de vehículos diarios, se observó que existe un promedio de más de 10000 automotores que circulan diariamente de lunes a viernes, el sábado existe un descenso en el número de tránsito vehicular llegando a un conteo aproximado de 8000 automotores por día. Y el domingo un aproximado de 5000 vehículos diarios. Considerando estos valores se decidió seleccionar dos días laborables y un día de descanso (fin de semana), un día a estudiar puede ser cualquier día entre lunes y jueves tomando en cuenta que comparte un mismo promedio de vehículos. El segundo día para estudiar será el viernes, que, a pesar de ser laborable, se lo considera como un día de transición, pues el tráfico vehicular disminuye. Y el último día que será estudiado, es el sábado, que entre los dos días de descanso es el que mayor número de vehículos tiene y que permite estudiar en tres escenarios diferentes, debido a que el domingo por la tarde, el tráfico que circula por dicha zona es demasiado bajo.

Cómo se explicó previamente los datos fueron procesados y utilizados para histogramas como se observa en la **Figura 15** que nos permitió definir las franjas horarias en las que se van a realizar el estudio. Estas franjas horarias serán una hora valle, una hora llano y una hora punto; es decir, una hora de menor flujo vehicular, una hora de flujo intermedio y una hora de máxima congestión o demanda. Estas franjas horarias serán de 06:00 a 07:00, de 09:00 a 10:00 y de 12:00 a 13:00 respectivamente.

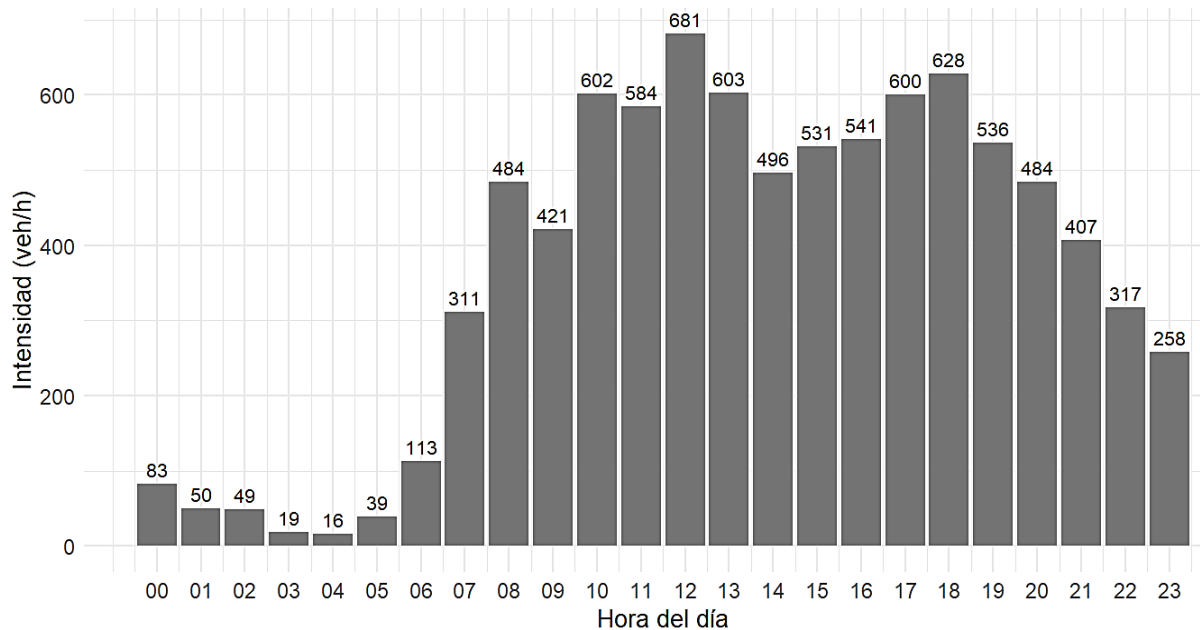


Figura 15. Intensidad vehicular horaria en la intersección día sábado
(Autoría Propia)

3.5 Campaña Experimental

En esta subsección, se habla a detalle sobre la campaña experimental realizada y sus características principales. En primer lugar, se describen las características generales de los días de estudio, posteriormente se añade información específica sobre el tráfico vehicular de cada franja horaria.

3.5.1 Características Generales de los Días de Estudio

La campaña experimental se llevó a cabo durante el mes de abril del año 2025. En ella, se realizó pruebas en tres días distintos: miércoles, viernes y sábado. En cada día se registró datos durante 1 hora en tres franjas horarias diferentes: una hora valle de 06:00 a 07:00, una hora llano de 09:00 a 10:00 y una hora punta de 12:00 a 13:00. Además, se llevó a cabo durante días y horarios en los que no se presentaron agentes externos como eventos que puedan alterar el tráfico por esta zona.

Es importante mencionar que, si bien se buscó caracterizar el comportamiento del tráfico vehicular en condiciones reales, los horarios utilizados no fueron totalmente estandarizados. Es decir, el estudio de flujo vehicular previo a la caracterización de una franja horaria estandarizada para cada día no fue realizado. Sin embargo, se buscó que el flujo vehicular y las condiciones externas sean las de un día normal y cuyos patrones presentados sean de uso

cotidiano de la vía. Con lo anteriormente mencionado, en las siguientes secciones se presenta más información sobre los escenarios escogidos.

3.5.1.1 Día Laborable: D1. Miércoles

El primer día seleccionado para realizar este estudio fue miércoles, un día laboral. Este día tuvo aproximadamente un flujo vehicular promedio de 10.000 vehículos. La cantidad de automotores estuvo distribuida en un porcentaje 60/40 entre las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo respectivamente. Por otro lado, los tres horarios escogidos para la campaña se encuentran resaltados con línea entrecortada en la **Figura 16**. Además, se pudo observar que la intensidad en la calle Bolívar tiene un pico a las 07:00 horas y se mantuvo con una tendencia estable el resto del día, mientras que la intensidad en la calle Oviedo tuvo un comportamiento más heterogéneo con dos picos destacables a medio día y a las 17:00 horas.

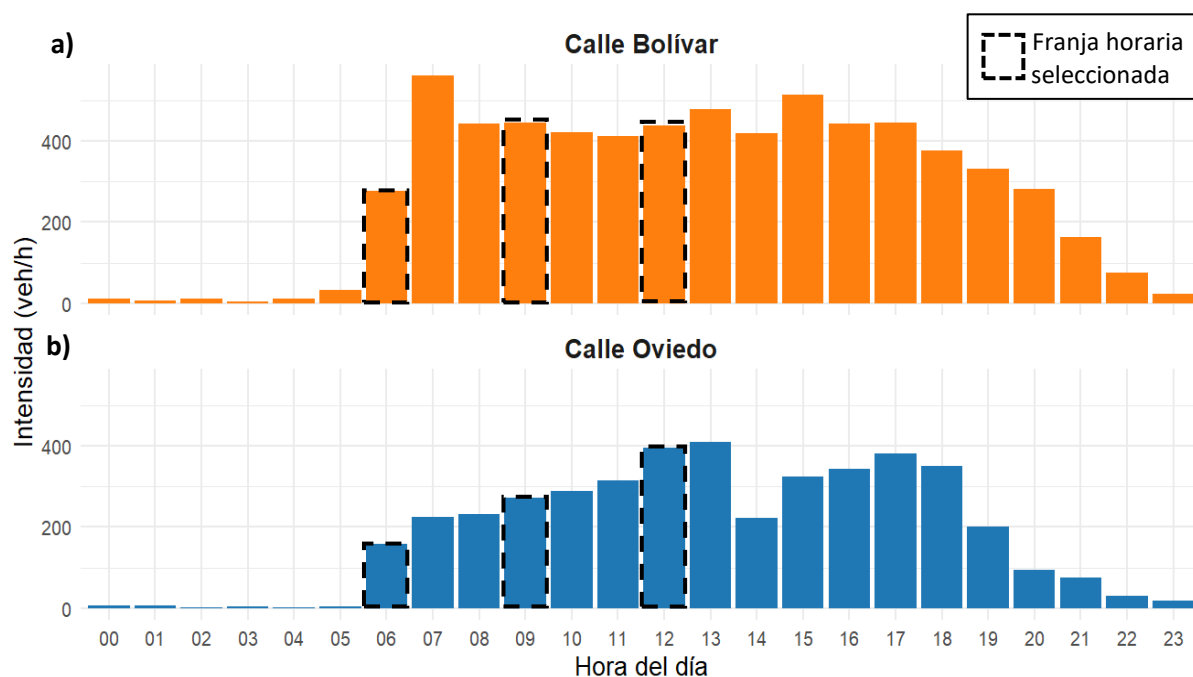


Figura 16. Intensidad vehicular horaria miércoles: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

3.5.1.2 Día Laborable: D2. Viernes

El siguiente día seleccionado es el día con más flujo vehicular de todo el estudio: viernes, un día laboral, pero a la vez, un día de transición hacia los días de descanso. Este día tuvo un flujo aproximado de 12.000 vehículos. Este promedio se encontró repartido al igual que el miércoles en un porcentaje de 60/40 entre las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo respectivamente. Y

el comportamiento del flujo vehicular en este día es igual al día miércoles. Así mismo, se realizó la medición de flujo en los tres horarios previamente mencionados. De igual manera, los horarios seleccionados se encuentran resaltados con línea entrecortada en la **Figura 17**. Se pudo observar una cantidad de vehículos muy similar a los datos del día miércoles, manteniendo una tendencia de tráfico.

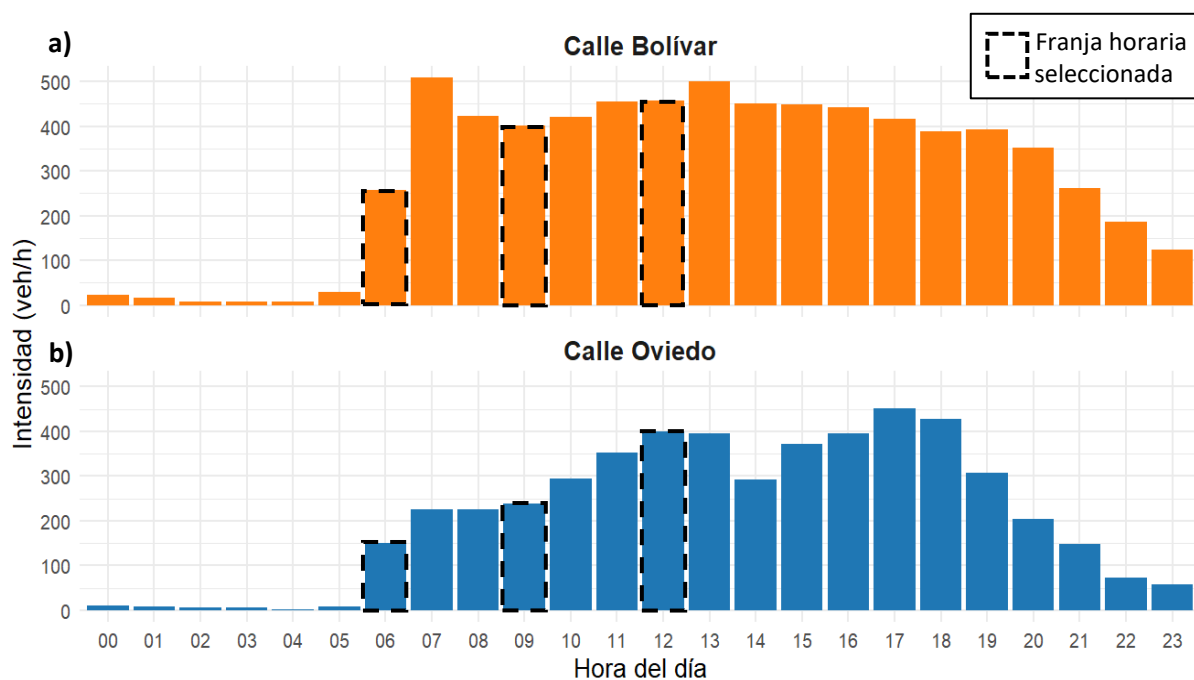


Figura 17. Intensidad vehicular horaria viernes: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

3.5.1.3 Día No Laborable: D3. Sábado

El último día seleccionado es el tercer promedio con más flujo vehicular del estudio: sábado, un día considerado de descanso. En este día existió un flujo aproximado de 8.500 vehículos. El promedio del flujo vehicular de este día se encuentra dividido en un porcentaje de 65/35 entre las dos calles: Simón Bolívar y Miguel Oviedo respectivamente. Nuevamente se repitió el mismo patrón en el comportamiento del flujo vehicular. Al igual que en los días anteriores, se realizó la recolección de datos en los tres horarios establecidos que se encuentran resaltados en la **Figura 18**. En estos datos se puede notar una diferencia con respecto a los otros días. Al ser un día de descanso, el primer horario disminuyó su intensidad, y los otros dos horarios, aunque no lo hicieron de manera tan notable como el primer horario, también hubo un descenso.

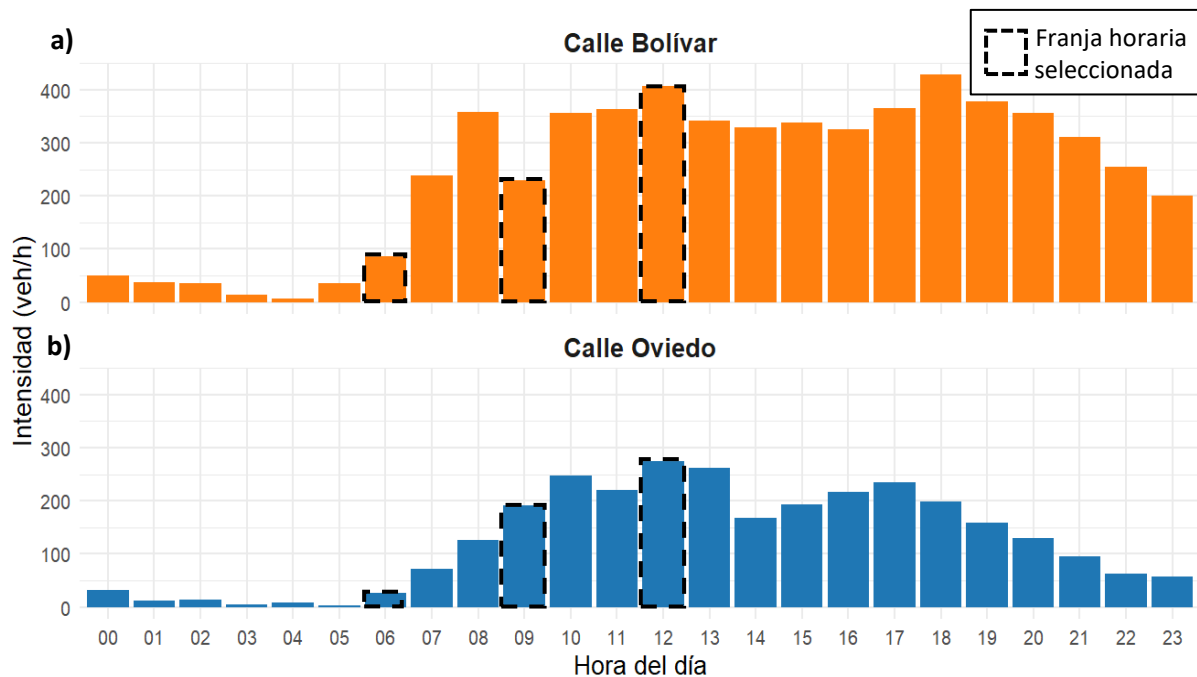


Figura 18. Intensidad vehicular horaria sábado: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

3.6 Procesamiento de Datos

El procesamiento de datos abarcó cuatro etapas, presentadas en la **Figura 19** y organizadas en dos fases principales. La primera fase correspondió al preprocesamiento de los datos, que incluyó la descarga, sincronización y limpieza de los registros obtenidos durante la campaña experimental. La segunda fase consistió en el procesamiento propiamente dicho, en el cual se calcularon todas las variables derivadas de los datos recopilados, mismas que están destinadas a su integración en el simulador. En las siguientes secciones se detallan los procedimientos y los programas utilizados en cada una de estas fases.

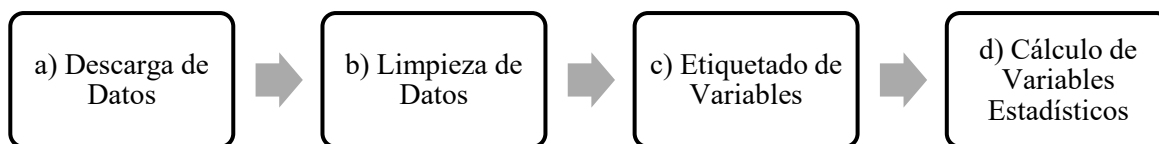


Figura 19. Proceso del procesamiento de datos (Autoría Propia)

3.6.1 Preprocesamiento de Datos

Durante esta etapa, los datos fueron preparados para los cálculos posteriores mediante el uso del software Excel como herramienta principal. El flujo de actividades desarrollado a lo largo

de esta fase se detalla en la **Figura 20**. El diagrama destaca los tres procesos fundamentales del preprocesamiento de datos: descarga, limpieza y agrupación de datos.

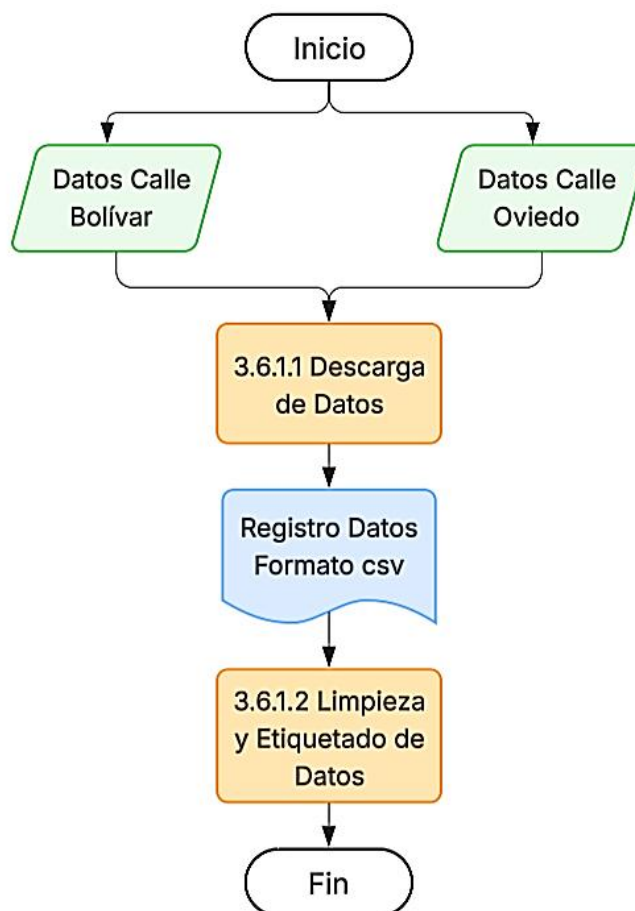


Figura 20. Diagrama de flujo preprocesamiento de datos
(Autoría Propia)

3.6.1.1 Descarga de Datos.

En primer lugar, se descargaron los registros de datos obtenidos por los equipos de recolección de información del tráfico que se observan en la **Figura 21**. Los archivos con los registros del flujo y la composición vehicular obtenidos mediante la Dahua Access ANPR Camera fueron tipo Excel xlsx, Sin embargo, fue necesario modificar de xlsx a csv. Este proceso se lo realizó desde el mismo software Excel.

No.	Tiempo de Instant.	Licencia NO	Tipo de vehículo	Tamaño
1	2025-04-26 06:01:00	PCV7244	Vehículo de tamaño pequeño	320
2	2025-04-26 06:01:33	PFL1744	Vehículo grande	320
3	2025-04-26 06:01:37	PIC153	Vehículo de tamaño pequeño	288
4	2025-04-26 06:06:34	TUJ64	Vehículo de tamaño pequeño	320
5	2025-04-26 06:06:49	PCK3445	Vehículo de tamaño pequeño	320
6	2025-04-26 06:09:18	TWLO	Vehículo de tamaño pequeño	352
7	2025-04-26 06:26:30	IBF2044	Vehículo de tamaño pequeño	448
8	2025-04-26 06:28:07	AA996J	Vehículo de tamaño pequeño	448
9	2025-04-26 06:28:22	GIC529	Vehículo de tamaño pequeño	448
10	2025-04-26 06:29:48	IMDD2	Vehículo grande	448
11	2025-04-26 06:32:28	ED25	Vehículo de tamaño pequeño	448
12	2025-04-26 06:32:37	I4E0252	Vehículo de tamaño pequeño	448
13	2025-04-26 06:33:13	IC0374	Vehículo de tamaño pequeño	480
14	2025-04-26 06:36:29	84G10HO	Vehículo de tamaño pequeño	480
15	2025-04-26 06:36:29	IBD6044	Vehículo de tamaño pequeño	480

Figura 21. Descarga de datos cámara Dahua Access (Autoría Propia)

3.6.1.2 Limpieza y Etiquetado de Datos.

Los datos de flujo y composición vehicular, almacenados en formato CSV, fueron procesados mediante limpieza y etiquetado utilizando el software R y su interfaz gráfica R Studio, representada en la **Figura 22**. Para optimizar la manipulación de datos en dataframes y la implementación de funciones, se emplearon los paquetes Tidyverse y dplyr, los cuales fueron descargados desde la red CRAN de la comunidad de R.

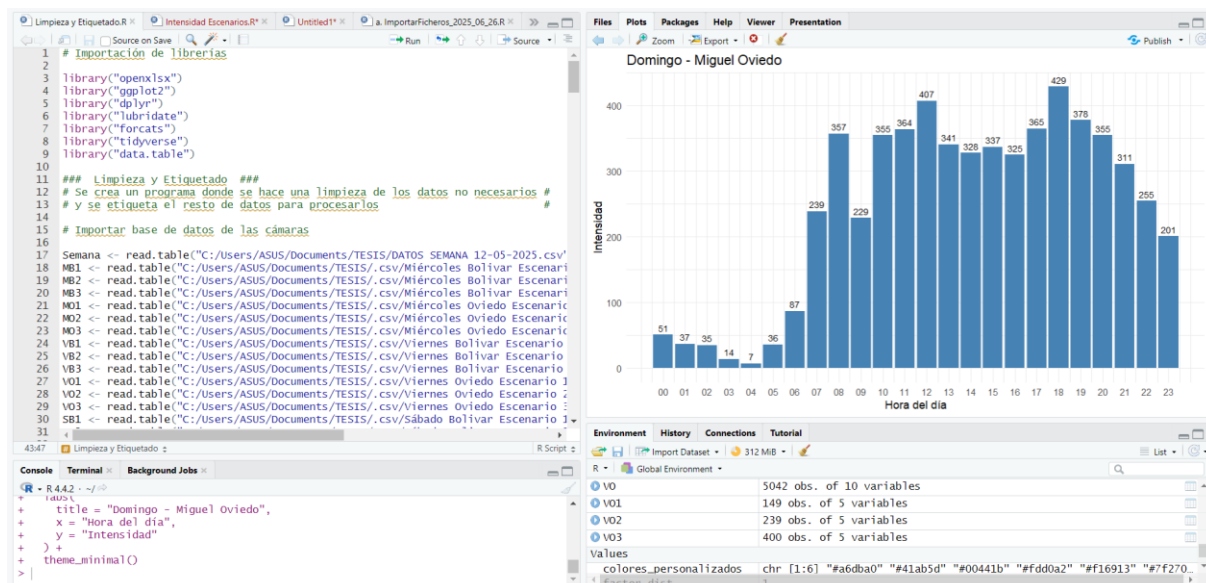


Figura 22. Interfaz gráfica de R Studio (Autoría Propia)

Para la limpieza y etiquetado de datos, se seleccionaron y clasificaron manualmente las variables relevantes para el estudio, debido a que las cámaras registraron automáticamente algunas variables no relevantes para la investigación. Estas variables se muestran a continuación en la **Tabla 8**. Adicionalmente, se llevó a cabo una transformación de tipo de datos en todos los registros experimentales, convirtiendo las variables de fecha y hora a un formato de tiempo compacto mediante la función `base::as.POSIXct`. Una vez ordenados los datos se pudo agruparlos por día y por horario.

Tabla 8. Variables limpieza y etiquetado de datos

Variable	Unidad/Variable
Hora	h
Nro. vehículos	veh
Calle	-
Tipo	SUV, sedán, camioneta, camión, motos
Intensidad	veh/h
Trayectorias	Continua recto, giro intersección

(Autoría Propia)

3.6.2 Procesamiento de Datos

En esta segunda fase, correspondiente al procesamiento de datos, se realizó todos los cálculos necesarios a partir de los datos preprocesados. El procedimiento llevado a cabo se dividió en dos etapas principales: a) el cálculo de promedios basado en la composición vehicular y b) el cálculo de promedios según las rutas tomadas por los vehículos. El flujo de actividades para esta etapa se detalla en la **Figura 23**.

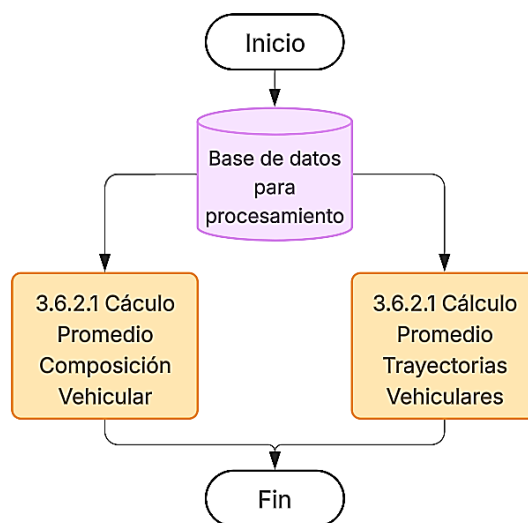


Figura 23. Diagrama de flujo procesamiento de datos
(Autoría Propia)

3.6.2.1 Cálculos de Promedios de la Composición Vehicular.

En primer lugar, con la base de datos preprocesados que contiene la información correspondiente a la composición de la flota vehicular, se calculó los porcentajes de participación para cada tipo de vehículo que transita por el área de estudio, estos son: SUV, sedán, camioneta, camiones, motos. Este proceso lo realizamos con ayuda de R Studio como se muestra en la **Figura 24**.

```
### Cálculo de Composición Vehicular ###
# Agrupar por cada tipo de vehículo
composicion <- S03 %>%
  group_by(Tipo.de.vehículo) %>%
  summarize(
    n = n()
  )
# Calcular el porcentaje
composicion <- composicion %>%
  mutate(
    porcentaje = (n / nrow(S03)) * 100
  )
# Mostrar los resultados
print(composicion)
```

Figura 24. Extracto de código de cálculo de promedios de la composición vehicular
(Autoría Propia)

3.6.2.2 Cálculos de Promedios de las Trayectorias Vehiculares.

De igual manera, se buscó ampliar la base de datos incorporando los valores registrados de manera manual sobre las trayectorias que toman los vehículos en la intersección y al igual que en el anterior punto se calculó sus porcentajes: continúa recto o gira en la intersección. Este proceso es muy similar al de la composición vehicular y también fue realizado en R Studio tal como se muestra en la **Figura 25**.

```

### Cálculo de las Rutas de los Vehículos ###

# Agrupar por cada tipo de vehículo

ruta <- S03 %>%
  group_by(Dirección) %>%
  summarize(
    n = n()
  )

# Calcular el porcentaje

ruta <- ruta %>%
  mutate(
    porcentaje = (n / nrow(S03)) * 100
  )

# Mostrar los resultados

print(ruta)

```

Figura 25. Extracto de código de cálculo de promedios de las rutas de vehículos
(Autoría Propia)

3.7 Simulación de Tráfico Y Modelado de Emisiones

En este capítulo final se expone el proceso de simulación del tráfico vehicular y el modelado de las emisiones generadas. Este procedimiento abarcó tres etapas, las cuales están representadas en la **Figura 26**. La primera etapa corresponde a la simulación del tráfico donde se realizó la configuración y calibración de los parámetros utilizados. La segunda etapa aborda el modelado de emisiones, donde se configuró los parámetros correspondientes y la salida de resultados. Finalmente, en la etapa de posprocesamiento de resultados se generó gráficos que sintetizan la información sobre las emisiones. En las siguientes secciones se describen en detalle los procesos aplicados en cada una de estas fases.

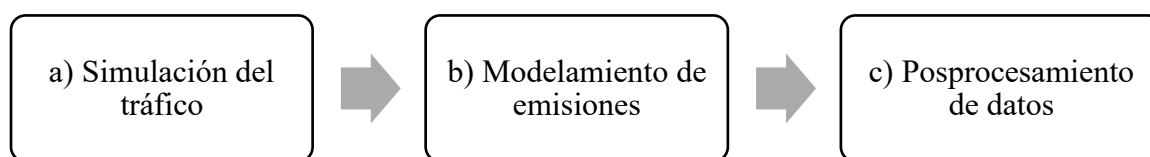


Figura 26. Proceso general de la simulación de tráfico y modelado de emisiones
(Autoría Propia)

3.7.1 Simulación del tráfico

En esta etapa se estableció los parámetros necesarios para la simulación del tráfico, empleando principalmente el software VISSIM. La **Figura 27** representa el flujo de actividades desarrollado durante esta fase. En las siguientes secciones se describe a detalle los procesos implementados en esta etapa.

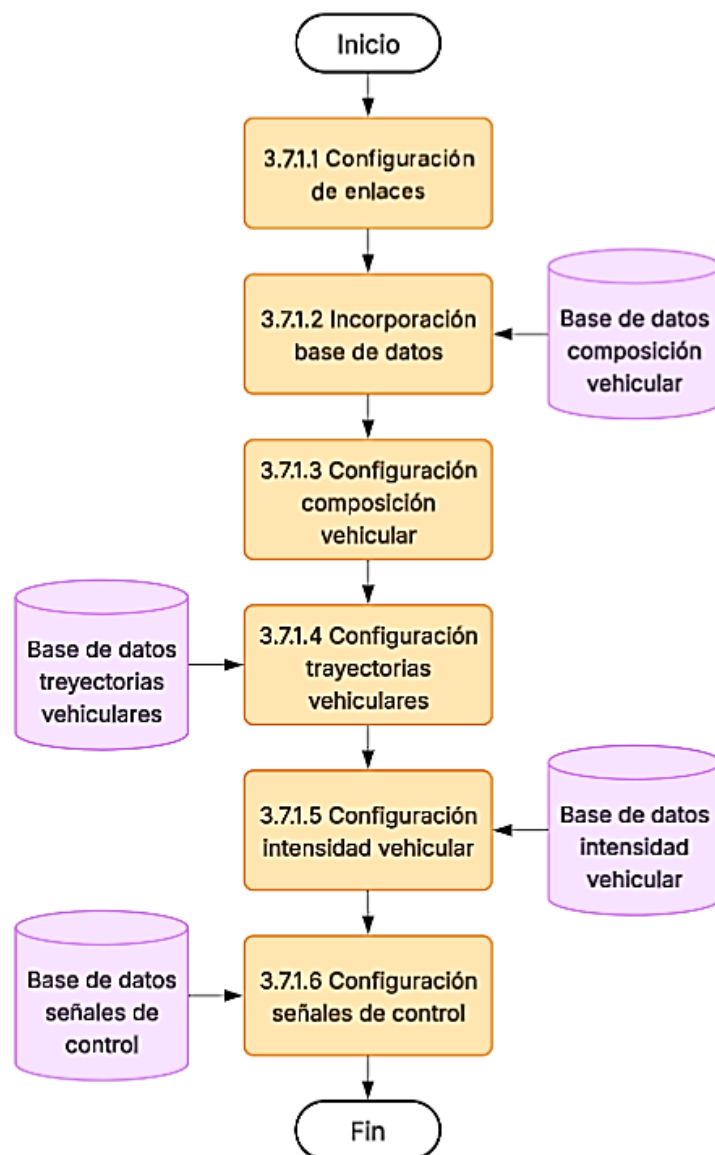


Figura 27. Diagrama de flujo de simulación del tráfico
(Autoría Propia)

3.7.1.1 Configuración de Enlaces.

Al abrir el software VISSIM, lo primero que se realizó es crear un nuevo archivo desde la parte superior izquierda. Al entrar en el nuevo archivo se abre el mapa mundial; para encontrar la ubicación se utilizó la opción “Buscar ubicación” situada en la parte superior izquierda del editor de red donde se ingresó el nombre de la ciudad de Ibarra y el mapa se amplió, con el mapa mostrando la ciudad como se indica en la **Figura 28**, se lo amplió con el scroll del ratón hasta ubicar nuestra zona de estudio.

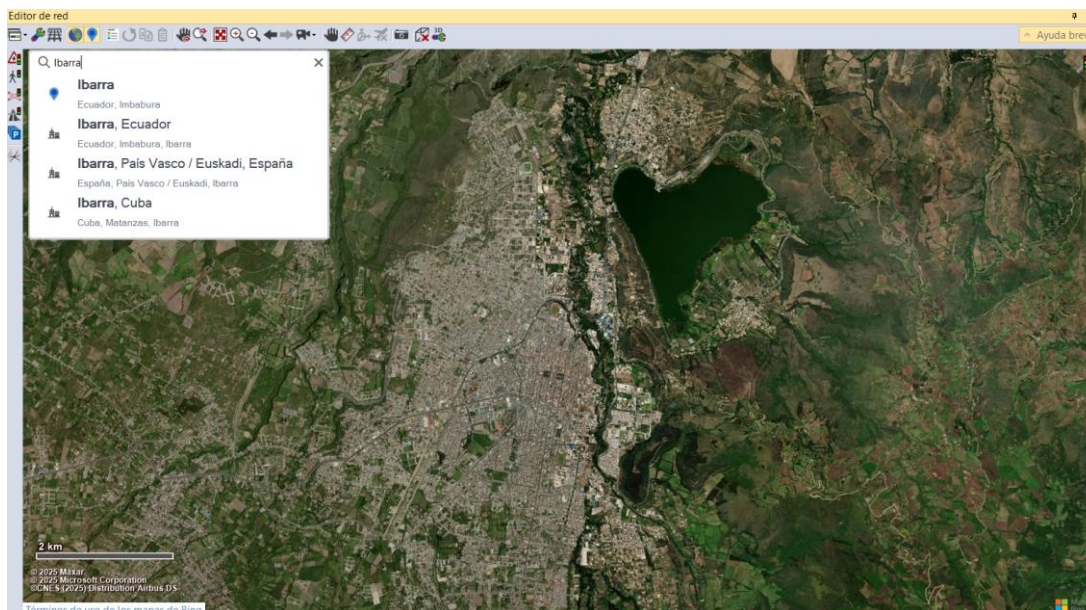


Figura 28. Interfaz Vissim para encontrar ubicación
(Autoría Propia)

Una vez ubicada la zona de estudio se añadió las vías o calles que en el software se los conoce como enlaces y podemos encontrarlos en la parte izquierda en el menú “Objetos de red”, al realizar este proceso se configuró los parámetros, mismos que son: la cantidad de carriles que tiene la vía y el ancho de cada carril. Estos datos ya se obtuvieron previamente en la campaña experimental y se añadieron como se muestra en la **Figura 29**. De igual manera, después de implementar los enlaces, se procedió a entrelazarlos entre sí, esto se consiguió con las uniones, que como su nombre lo indica unen los enlaces y también se encuentra en “Objetos de red”.

Número	Índice	Ancho	TipoComp...	ClasesVeh...	TipoVisual...	TipoMarcas	SinCambi...	SinCambi...	SinCambi...	SinCambi...
1	1	3,00				1: En el pa...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	2	3,00				1: En el pa...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 29. Interfaz VISSIM para configuración de enlaces
(Autoría Propia)

3.7.1.2 Incorporación Base de Datos Vehicular.

Una vez creado los enlaces, se configuró los vehículos que transitan por el área de estudio. Para este proceso hay que ir a la opción Datos básicos, Modelos 2D/3D donde existe una lista de modelos preestablecidos del sistema; sin embargo, para el presente trabajo de investigación se seleccionó nuevos vehículos basándose en la composición de la flota vehicular que transita por la zona con los datos que fueron obtenidos en la campaña experimental. Este proceso se muestra en la **Figura 30**.

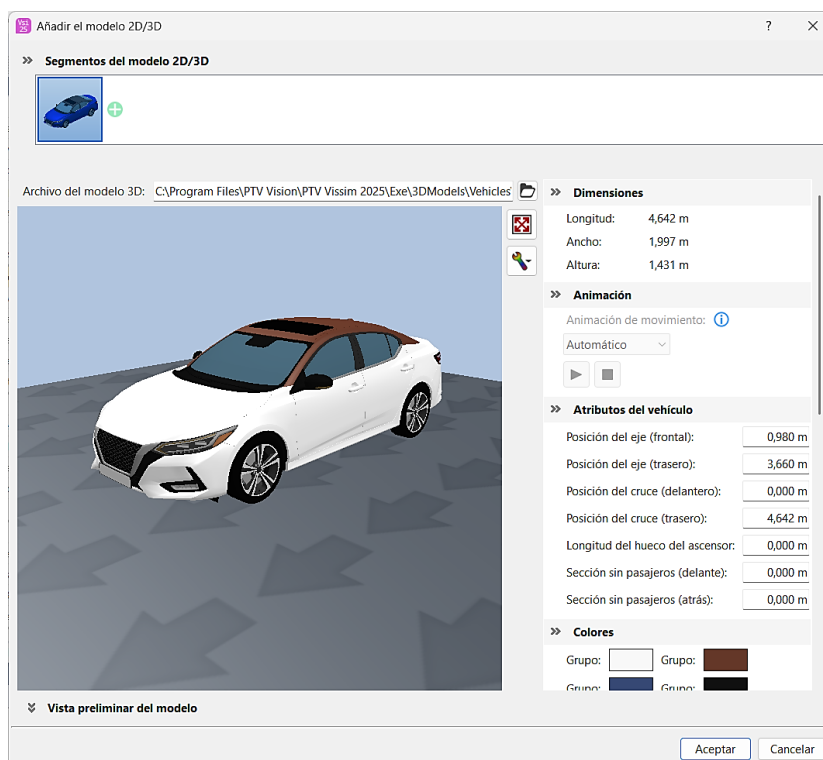


Figura 30. Interfaz VISSIM para añadir vehículos
(Autoría Propia)

Este es solo uno de los pasos para incorporar los vehículos a la base de datos. Para continuar el proceso también se agregaron los nuevos vehículos en las siguientes secciones: Datos básicos-Distribución, Datos básicos-Tipos de vehículos y Datos básicos-Clase de Vehículos. Estas secciones se las encuentra en la parte superior del software y al seleccionarlas se despliegan en la parte inferior de la pantalla como se muestran a continuación en la **Figura 31**.

Distribuciones de modelo 2D/3D / Elementos				Tipos de vehículo				Clases de vehículo / Tipos de vehículo							
Número: 15	Nombre	Número: 1	Modelo2D3D	Número: 14	Núm	Nombre	Categoría	DistrModelo2D3D	Número: 12	Núm	Nombre	TiposVeh	UsaColor	TipoVeh	Color
5	40 Tranvía	1	0,100 303: SEDAN	3	200 HGV	HGV	20: HGV		1	10	Automóvil	100	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
6	61 Hombre en bicicleta			4	300 Autobús	Autobús	30: Autobús		2	19	LGV	190	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
7	62 Mujer en bicicleta			5	400 Tranvía	Tranvía	40: Tranvía		3	20	HGV	200	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
8	100 Hombre			6	510 Hombre	Peatón	100: Hombre		4	30	Autobús	300	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
9	200 Mujer			7	520 Mujer	Peatón	200: Mujer		5	40	Tranvía	400	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
10	300 Silla de ruedas			8	610 Hombre en bicicleta	Bicicleta	61: Hombre en bicicleta		6	50	Pestones	510,520	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
11	400 MOTOS			9	620 Mujer en bicicleta	Bicicleta	62: Mujer en bicicleta		7	60	Bicicleta	610,620	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
12	500 SEDAN			10	630 MOTOS	Bicicleta	400: MOTOS		8	70	MOTOS	630	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
13	600 SUV			11	640 SEDAN	Automóvil	500: SEDAN		9	80	SEDAN	640	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
14	700 CAMIONETA			12	650 SUV	Automóvil	600: SUV		10	90	SUV	650	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
15	800 CAMION			13	660 CAMIONETA	Automóvil	700: CAMIONETA		11	100	CAMION...	660	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)
				14	670 CAMION	Automóvil	800: CAMION		12	110	CAMION	670	<input checked="" type="checkbox"/>		(255, 0, 0, 0)

Figura 31. Interfaz VISSIM - Secciones para agregar vehículos (Autoría Propia)

3.7.1.3 Configuración Composición Vehicular.

Una vez agregados los nuevos vehículos, se procedió a configurar la composición vehicular. Para realizar este proceso en la opción Tráfico, sección Composiciones de Vehículos, se creó dos nuevas variables, una por cada enlace. En cada variable se añadió los vehículos previamente incorporados a la base de datos y se configuró con su velocidad y porcentaje de participación como se muestra en la **Figura 32**.

Composiciones de vehículo / Flujos relativos				Composiciones de vehículo / Flujos relativos			
Número: 4	Núm	Nombre		Número: 5	TipoVeh	DistVelDes	FlujoRel
1	1	Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)		1	630: MOTOS	50: 50 km/h	0,100
2	2	Solo automóvil (50 km/h)		2	640: SEDAN	40: 40 km/h	0,450
3	3	Simón Bolívar		3	650: SUV	40: 40 km/h	0,250
4	4	Miguel Oviedo		4	660: CAMION...	30: 30 km/h	0,150
				5	670: CAMION	25: 25 km/h	0,050

Figura 32. Interfaz VISSIM para composición vehicular (Autoría Propia)

3.7.1.4 Configuración Trayectorias Vehiculares.

A través de la opción Rutas del vehículo ubicada en los Objetos de red, se añadió las posibles rutas o trayectorias que pueden tomar los vehículos que transitan por el área de estudio, en la calle Simón Bolívar estas opciones pueden ser continúa recto o giro a la derecha y en la calle Miguel Oviedo, las opciones serán continúa recto o giro a la izquierda. De igual manera estas rutas también fueron configuradas añadiendo los porcentajes de vehículos que toman cada ruta como se muestra en la **Figura 33**.

Decisiones de enrutamiento de vehículos estático / Rutas de vehículo estáticas													
Rutas de vehículo es:													
Número: 2	Núm	Nombre	Enlace	Posic	TodosTiposVeh	Número: 2	DecRutaVeh	Núm	Nombre	Fórmula	EnlaceDest	PosDest	FlujoRel(0-MAX)
1	1		1: Simón Bolívar	78,729	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	1			3: Simón Bolívar	30,604	0,700
2	3		2: Miguel Oviedo	87,089	<input checked="" type="checkbox"/>	2	1	2			4: Miguel Oviedo	16,929	0,300

Figura 33. Interfaz VISSIM para rutas de vehículos
(Autoría Propia)

3.7.1.5 Configuración Intensidad Vehicular.

Para configurar la intensidad vehicular, en el apartado de Objetos de red se seleccionó la herramienta Ingresos de vehículos, con esta opción se dio clic en el enlace donde se desea añadir los vehículos y se creó una nueva entrada donde se añadió el volumen de vehículos y la composición vehicular previamente configurados y que está detallado en la sección 3.7.1.3. Este proceso se muestra en la **Figura 34**.

Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo						
Volúmenes de vehíc						
Número: 2	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)	
1	1		1: Simón Bolívar	500,0	3: Simón Bolívar	
2	2		2: Miguel Oviedo	300,0	4: Miguel Oviedo	

Figura 34. Interfaz VISSIM para ingresos de vehículos
(Autoría Propia)

3.7.1.6 Configuración Señales de Control.

En esta última sección se detalla la configuración de las señales de control. Para realizar este proceso en la opción Control de señales se agregó un nuevo controlador de señales y se lo configuró editando los datos de éste. Para configurar estos parámetros se añadió dos grupos de señales, uno por cada enlace y se implementó sus colores. Después de esto, se completó la programación de las fases del semáforo utilizando la base de datos levantada en la campaña experimental, en este caso la intersección estudiada tiene un ciclo de 94 segundos con tres fases distribuidas de la siguiente manera, verde: 43 segundos, amarillo: 4 segundos, y rojo 47 segundos, intercalados entre las dos calles como se observa en la **Figura 35**. Al terminar de configurar se agregó los semáforos a los enlaces con la ayuda de la herramienta Cabezales de señal ubicada en el apartado de Objetos de red.

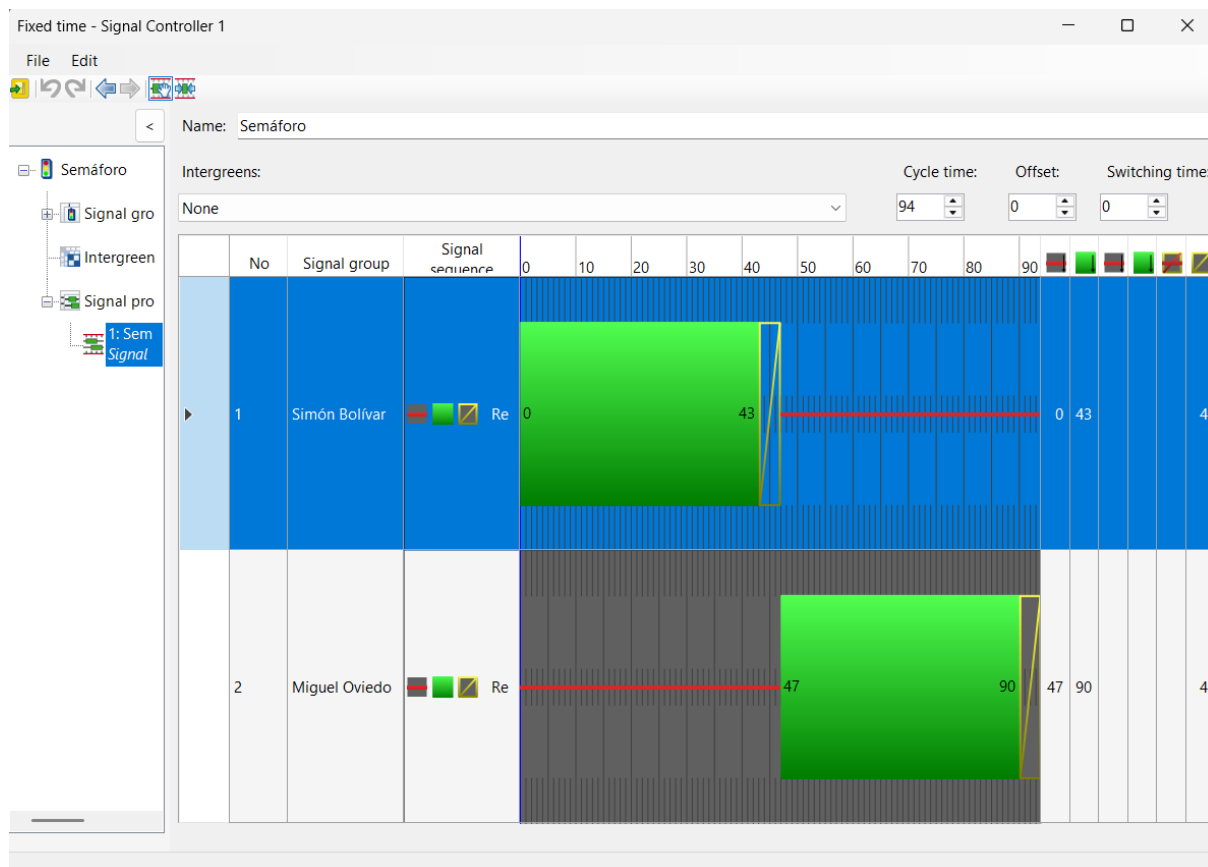


Figura 35. Interfaz VISSIM para controladores de señales
(Autoría Propia)

3.7.2 Modelamiento de Emisiones

Una vez que fueron definidos los parámetros esenciales para el tráfico, se procedió con la configuración de los parámetros de simulación, así como también con los parámetros destinados a la evaluación y salidas de resultados. El flujo de actividades ejecutado en el software VISSIM para esta fase se presenta en la **Figura 36**. En las siguientes secciones se detallan los procesos realizados durante esta etapa.

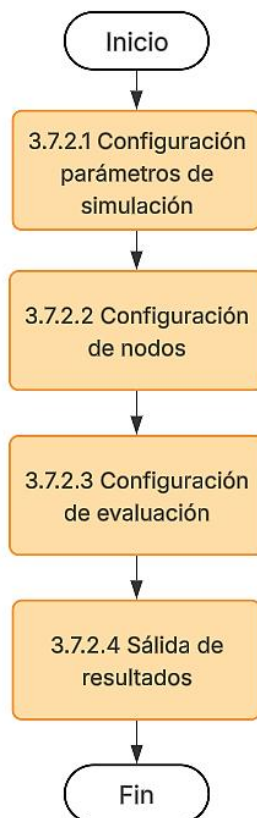


Figura 36. Proceso general para estimación de emisiones
(Autoría Propia)

3.7.2.1 Configuración Parámetros de Simulación.

Para garantizar la calidad de los resultados obtenidos, fue necesario configurar los parámetros de simulación, tales como: el periodo, la hora, la fecha y la velocidad de ejecución. Estos valores se ajustaron dentro de la opción Simulación, en la sección Parámetros. En el presente estudio, se configuró un periodo de simulación de 3600 segundos, las horas fueron en los intervalos de 06:00-07:00, 09:00-10:00 y 12:00-13:00, y las fechas fueron miércoles 14 de mayo, viernes 16 de mayo y sábado 17 de mayo, conforme se definió previamente en la campaña experimental. La **Figura 37** ilustra este procedimiento.

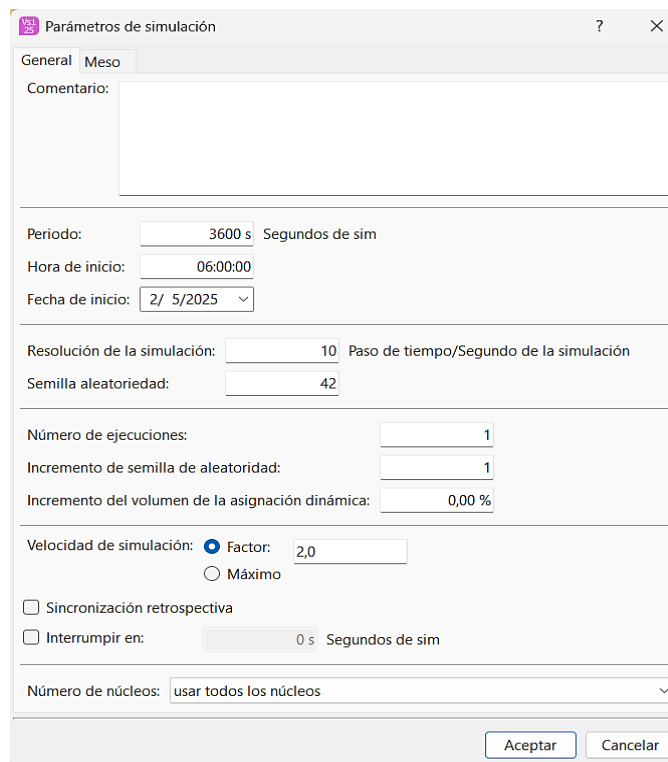


Figura 37. Interfaz VISSIM para parámetros de simulación
(Autoría Propia)

3.7.2.2 Configuración de Nodos.

El siguiente paso por realizar fue dibujar los nodos, es importante mencionar que un nodo es la zona que se grafica para que el simulador evalúe el comportamiento del tráfico y permita extraer los resultados en el área de estudio. Para graficar el área de estudio deseada, se utilizó la herramienta Nodos ubicada en el apartado Objetos de Red y se diseñó el nodo como se muestra en la **Figura 38**. Es importante recalcar que los semáforos deben encontrarse dentro del nodo para su evaluación.

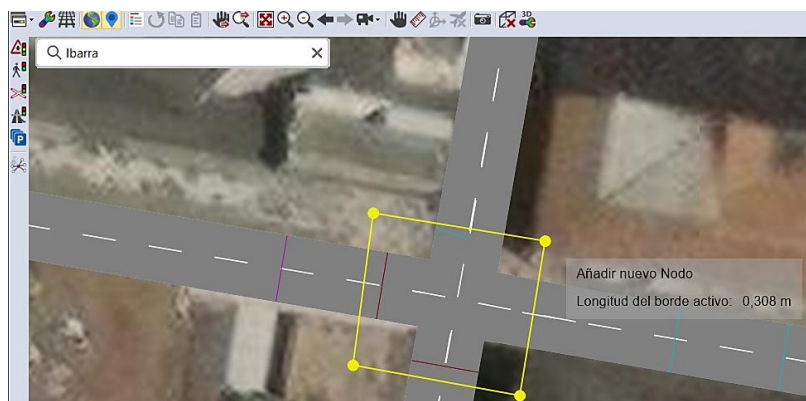


Figura 38. Interfaz VISSIM de nodos
(Autoría Propia)

3.7.2.3 Configuración de Evaluación.

Para configurar los resultados esperados, se selecciona las opciones necesarias y se configura sus parámetros. Este proceso se realizó en la opción Evaluación, en la sección de Configuración, aquí aparece una ventana con todos los resultados que se puede obtener y se seleccionó y configuró los Atributos de Resultados que son necesarios para el estudio como se muestra en la **Figura 39**. Los atributos seleccionados fueron: a) Nodos para extraer los resultados de longitud de cola, emisiones de CO, emisiones de NO_x, emisiones de COV, y el consumo, y b) Recopilaciones de datos para resultados de velocidades. Además, se configuró el tiempo que dura la simulación en 3600 segundos y con un intervalo de lectura de datos de 1 segundo.

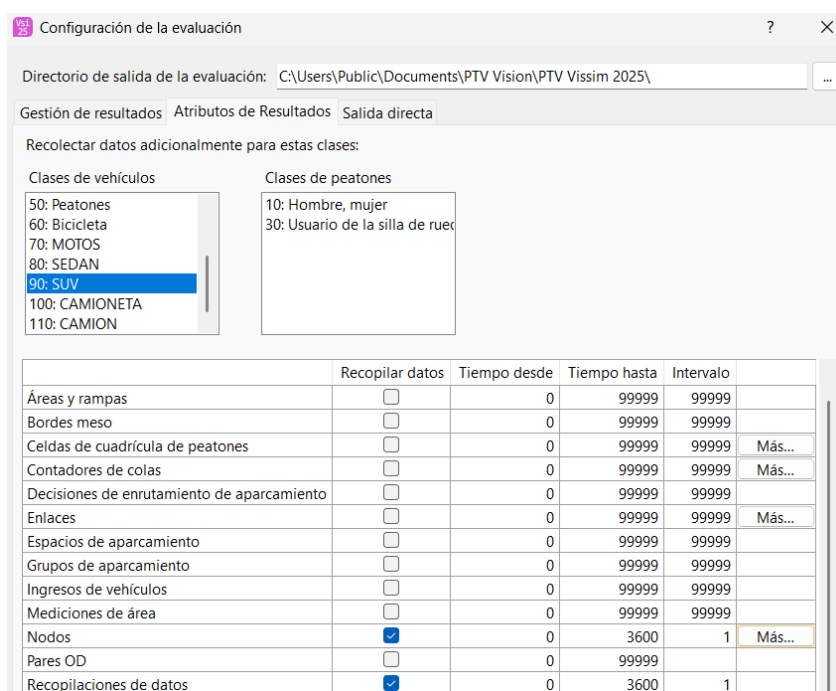


Figura 39. Interfaz VISSIM de configuración de la evaluación (Autoría Propia)

3.7.2.4 Salida de Resultados.

Para finalizar, únicamente se solicitó al software que muestre los resultados previamente configurados como fueron las emisiones de CO, NO_x, COV, el consumo y la velocidad. Para esto en la misma opción de Evaluación, en la sección Lista de resultados, se seleccionó la opción Resultados de nodos y Resultados de recopilación de datos; éstos aparecieron en la parte inferior. Simplemente se inicia la simulación y ya se puede observar los resultados como se muestra en la **Figura 40**, de igual manera se puede descargarlos si es necesario.



Figura 40. Interfaz VISSIM de simulación y resultados
(Autoría Propia)

3.7.3 Generación de escenarios

Por otro lado, se deseó evaluar la influencia de los semáforos en las emisiones y para conseguirlo se creó nuevos escenarios, tomando como referencia el día más desfavorable: Viernes en el horario de 12:00 a 13:00, este horario tiene la mayor intensidad de tráfico y el mayor nivel de emisiones, para realizar este análisis se hizo un cambio en el software, implementando dos propuestas nuevas en la configuración de los semáforos aparte de la configuración que ya estaba ingresada y que es la que actualmente funciona, estas configuraciones se detallan a continuación en la **Tabla 9**. Con estos dos nuevos escenarios se evaluaron los mismos resultados, únicamente se modificó la configuración del semáforo haciendo clic derecho sobre los cabezales de señales y con la opción de editar se cambió la configuración a las nuevas propuestas.

Tabla 9. Configuraciones de los Semáforos

	Simón Bolívar			Miguel Oviedo		
	Verde	Amarillo	Ciclo Total	Verde	Amarillo	Ciclo Total
E1: actual	43	4	47	43	4	47
E2: propuesta A	46	4	50	36	4	40
E3: propuesta B	51	4	55	31	4	35

(Autoría Propia)

3.7.4 Posprocesamiento de datos

En esta última etapa se realizó el posprocesamiento de datos donde se generó las gráficas de las emisiones modeladas. Es importante mencionar que este proceso se lo realizó al final debido a que los datos iniciales de preprocesamiento y procesamiento fueron utilizados como datos de entrada para la simulación de tráfico. Este proceso se lo realizó en el software RStudio donde se pueden manejar de manera más eficaz los datos y crear gráficas adecuadas acorde a los resultados obtenidos. La **Figura 41** representa el flujo de actividades desarrollado en esta fase.

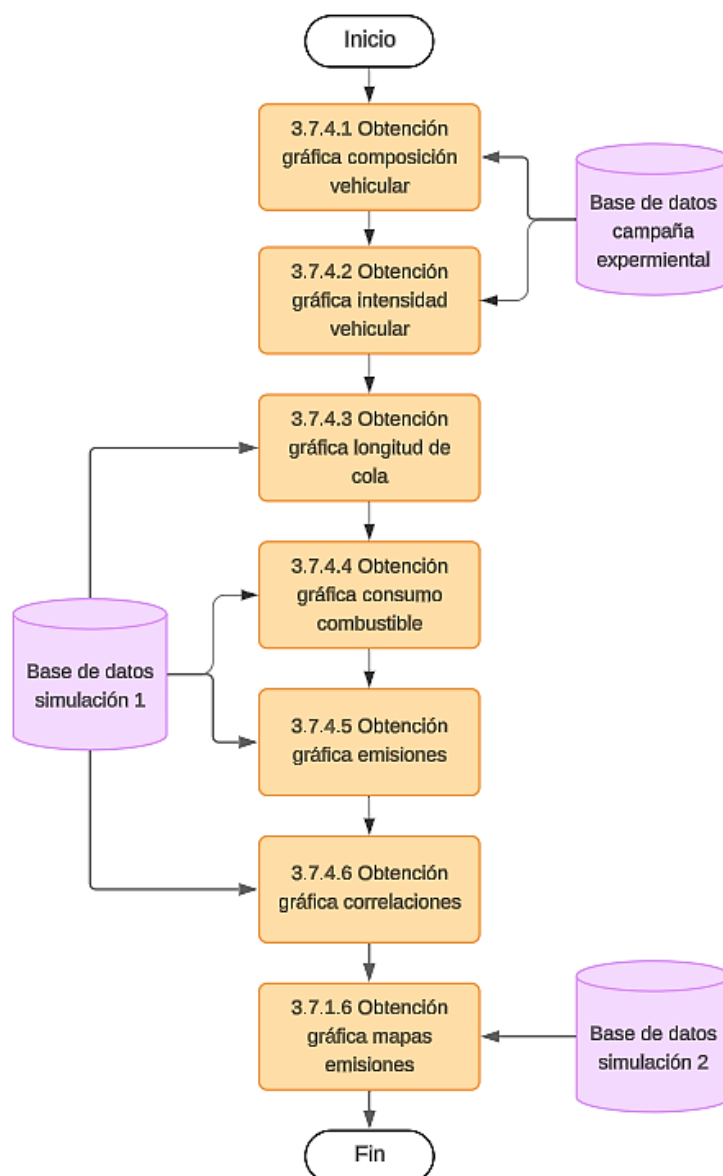


Figura 41. Diagrama de flujo de posprocesamiento de datos (Autoría Propia)

3.7.4.1 Obtención gráfica de la composición vehicular.

En la etapa final del proceso, los datos previamente procesados de la campaña experimental se utilizaron para realizar gráficas de cada variable obtenida en este estudio. Se comenzó graficando la composición de la flota vehicular. Primero en el software R se realizó un dataframe que contenía los porcentajes previamente calculados de cada vehículo para cada franja horaria de los tres días de estudio. Luego utilizando ggplot se realizó gráficas apiladas para comparar la composición vehicular entre franjas horarias. Este proceso se muestra en la **Figura 42**. Cabe mencionar que la librería ggplot será empleada para realizar todas las gráficas en esta fase de postprocesamiento.

```
# Gráfico superior
grafico_arriba <- ggplot(df_arriba, aes(x = Enlace, y = Porcentaje, fill = Tipo.de.vehículo)) +
  geom_bar(stat = "identity", width = 0.5) +
  facet_wrap(~Hora, ncol = 2) +
  labs(title = NULL, x = NULL, y = "Distribución (%)") +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(legend.position = "none")

# Gráfico inferior con facet_wrap y sin título
grafico_abajo <- ggplot(df_abajo, aes(x = Enlace, y = Porcentaje, fill = Tipo.de.vehículo)) +
  geom_bar(stat = "identity", width = 0.5) +
  facet_wrap(~Hora, ncol = 2) +
  labs(title = NULL, x = NULL, y = "Distribución (%)") +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(legend.position = "none")

# Leyenda aparte
leyenda <- get_legend(
  ggplot(df_abajo, aes(x = Enlace, y = Porcentaje, fill = Tipo.de.vehículo)) +
  geom_bar(stat = "identity") +
  theme_minimal(base_size = 13) +
  theme(legend.position = "right")
)

# Unir gráfico de 12:00 con leyenda (mitad izquierda gráfica, derecha leyenda)
fila_inferior <- ggarrange(grafico_abajo, leyenda, ncol = 2, widths = c(1.3, 1.1))

# Unir todo con alturas iguales
grafico_final <- ggarrange(grafico_arriba, fila_inferior,
  ncol = 1, heights = c(1, 1))
```

Figura 42. Extracto de código gráficas composición vehicular
(Autoría Propia)

3.7.4.2 Obtención gráfica de intensidad vehicular

Utilizando nuevamente los datos obtenidos en la campaña experimental. En el mismo software R, se realizó las gráficas de la intensidad vehicular. En este caso se hizo dos gráficas, una de la intensidad diaria y otra de la intensidad horaria. En primer lugar, se clasificó los datos por días y por horas y luego se ilustró la gráfica correspondiente para cada caso con la ayuda de ggplot.

Estas figuras fueron gráficas de dispersión con líneas. Parte de este proceso se muestra a continuación en la **Figura 43**.

```
ggplot(df_total, aes(x = as.numeric(hora), y = cantidad, color = calle)) +
  geom_point(size = 2.5) +
  geom_line(aes(group = calle), linewidth = 1.2) +
  scale_x_continuous(
    breaks = 0:23,
    labels = sprintf("%02d", 0:23)
  ) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, NA)) +
  scale_color_manual(values = c("Bolivar" = "#f16913", "Oviedo" = "skyblue")) +
  labs(
    title = NULL,
    x = "Hora del día",
    y = "Intensidad (veh/h)",
    color = "Calle"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    axis.text = element_text(size = 15),
    axis.title = element_text(size = 17, face = "bold"),
    legend.title = element_text(size = 15),
    legend.text = element_text(size = 15),
    legend.position = c(0.15, 0.8),
    legend.background = element_rect(fill = "white", color = "black")
  )
)
```

Figura 43. Extracto de código gráficas intensidad vehicular
(Autoría Propia)

3.7.4.3 Obtención gráfica de longitud de cola

Para estas gráficas se empleó los datos obtenidos de la simulación realizada en Vissim. Nuevamente en el software R, se hizo una limpieza de datos similar a la realizada en el procesamiento, pero esta vez con los datos del simulador. Luego se ordenó en diferentes dataframes según el tipo de resultado obtenido. En este proceso se usó un dataframe con los datos únicamente de la longitud de cola ordenados por calle, franja horaria y en intervalos de 5 minutos. Una vez ordenados los datos en un dataframe, se hizo una gráfica con las dos calles por separado y cada una con su franja horaria como se muestra en la **Figura 44**.

```

ggplot(df_escenarioslimpios4, aes(x = Hora, y = LongitudCola,
                                color = Calle,
                                linetype = as.factor(Escenario),
                                group = interaction(Calle, Escenario))) +
  geom_line(size = 1) +
  scale_color_manual(values = c("Calle Bolívar" = "#ff7f0e", "Calle Oviedo" = "#1f77b4")) +
  scale_linetype_manual(values = c("1" = "solid", "2" = "dashed", "3" = "dotted")) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 12, 2)) +
  facet_wrap(~ Calle, ncol = 1, scales = "fixed",
            strip.position = "top", axes = "all_x") +
  labs(
    title = NULL,
    x = "Intervalo (minutos)",
    y = "Número de carros",
    linetype = "Franja horaria",
    color = NULL # ocultamos la leyenda de color porque ya está fija por calle
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5, size = 10),
    legend.position = "bottom",
    legend.title = element_text(size = 14),
    legend.text = element_text(size = 14),
    strip.text = element_text(face = "bold", size = 13),
    axis.text.x = element_text(size = 13),
    axis.text.y = element_text(size = 13),
    axis.title.x = element_text(size = 15),
    axis.title.y = element_text(size = 15),
    axis.ticks.x = element_line(),
    panel.spacing = unit(0.5, "lines")
  ) +
  guides(color = "none")

```

Figura 44. Extracto de código gráficas longitud de cola
(Autoría Propia)

3.7.4.4 Obtención gráfica de consumo de combustible

En este proceso también se usó los datos derivados de la simulación, mismos que fueron previamente procesados. Se utilizó el dataframe que contenía los datos correspondientes al consumo de combustible, este dataframe era el resultante de las dos vías juntas y de igual manera se lo ordeno por franja horaria y en intervalos de 5 minutos. La gráfica es una sola con el resultado de la suma de las dos calles y se la realizó como lo indica la **Figura 45**.

```

ggplot(df_escenarioslimpios, aes(x = Hora, y = Consumo, group = Intervalo,
  geom_line(linewidth = 1.2, color = "#737373") +
  geom_point(size = 2, color = "#737373") +
  scale_linetype_manual(
    values = c(
      "06:00 - 07:00" = "solid",
      "09:00 - 10:00" = "dashed",
      "12:00 - 13:00" = "dotted"
    )
  ) +
  labs(
    title = NULL,
    x = "Intervalo",
    y = "Consumo (l)",
    linetype = "Franja Horaria"
  ) +
  theme_minimal(base_size = 16) +
  theme(
    axis.title.x = element_text(size = 16,),
    axis.title.y = element_text(size = 16),
    axis.text.x = element_text(size = 14, angle = 0, hjust = 0.5),
    axis.text.y = element_text(size = 14),
    legend.title = element_text(size = 14),
    legend.text = element_text(size = 13),
    legend.position = "bottom",
    legend.spacing.y = unit(0, "cm"),
    legend.box.margin = margin(-15),
    plot.margin = margin(t = 2, r = 2, b = 1, l = 2)
  )
)

```

Figura 45. Extracto de código gráficas consumo combustible
(Autoría Propia)

3.7.4.5 Obtención gráfica de emisiones de NO_x y CO

Nuevamente se utilizó los datos de la simulación de Vissim ya procesados. Para esta fase se empleó el dataframe con los datos resultantes de emisiones de NO_x y CO, estos datos al igual que el consumo pertenecían a las dos vías juntas, ordenados por franja horaria y en intervalos de 5 minutos. La gráfica fue diseñada con dos ejes “y”, uno para cada tipo de emisión, diferenciados por color, tal como se puede ver en la **Figura 46**.

```

ggplot(df_emisiones, aes(x = Hora)) +
  geom_line(
    aes(
      y = Valor,
      group = interaction(Emission, Horario),
      color = Emission,
      linetype = Horario
    ),
    linewidth = 1
  ) +
  geom_point(
    aes(
      y = Valor,
      color = Emission,
      shape = Emission
    ),
    size = 2
  ) +
  scale_color_manual(
    values = c("CO" = "#41ab5d", "NOx" = "#807"),
    name = "Tipo de emisión"
  ) +
  scale_linetype_manual(
    values = estilos_linea,
    name = "Franja horaria"
  ) +
  scale_shape_manual(
    values = c("CO" = 16, "NOx" = 15),
    name = "Tipo de emisión"
  ) +
  scale_y_continuous(
    name = "Emisiones CO (g)",
    sec.axis = sec_axis(~ . / 5, name = expression("Emisiones NO"[x]*"(g)"))
  )

```

Figura 46. Extracto de código gráficas emisiones
(Autoría Propia)

3.7.4.6 Obtención gráfica de correlaciones

Para las gráficas de correlaciones se utilizó los datos del consumo de combustible, las emisiones de CO y las emisiones de NO_x, realizando tres correlaciones: entre consumo y NO_x, consumo y CO, y CO y NO_x. De igual manera estas gráficas representan el resultante de las dos calles juntas. La gráfica está dividida por franjas horarias y parte del proceso de su creación se muestra a continuación en la **Figura 47**.

```

estilos_linea <- c(
  "06:00 - 07:00" = "solid",
  "09:00 - 10:00" = "dashed",
  "12:00 - 13:00" = "dotted"
)

# Asegurar orden de los factores
df_escenarioslimpios$Intervalo <- factor(
  df_escenarioslimpios$Intervalo,
  levels = c("06:00 - 07:00", "09:00 - 10:00", "12:00 - 13:00")
)

ggplot(df_escenarioslimpios, aes(x = FENox, y = FECO)) +
  geom_point(aes(color = Intervalo), size = 3) +
  geom_smooth(
    aes(linetype = Intervalo),
    method = "lm",
    se = FALSE,
    linewidth = 1.2,
    color = "#737373" # Color plomo para todas las líneas
  ) +
  scale_color_manual(
    values = c(
      "06:00 - 07:00" = "#737373",
      "09:00 - 10:00" = "#737373",
      "12:00 - 13:00" = "#737373"
    )
  ) +
  scale_linetype_manual(
    values = estilos_linea
  ) +
  facet_wrap(~ Intervalo, scales = "free_x") +
  labs(
    title = NULL,

```

Figura 47. Extracto de código gráficas correlación
(Autoría Propia)

3.7.4.7 Obtención gráfica de mapas de emisiones

Por último, para los mapas de emisiones se utilizó los datos de la simulación de Vissim, pero con los escenarios creados con las nuevas configuraciones de los semáforos. En este caso, se empleó los resultados de consumo y emisiones de NO_x, para poder evidenciar como cambia. En estas gráficas primero se obtuvo el mapa con la ayuda de stadia, luego se graficó el mapa y se superpuso los datos de emisiones en las coordenadas correspondientes. Se hizo un mapa por cada escenario y se los unió en una sola gráfica para poder observar la diferencia. En la **Figura 48** se muestra un extracto del código utilizado.

```

# Registrar la clave de Stadia
register_stadiamaps(key = "17b00695-91b0-4eac-bed6-3e655324af71", write = FALSE)

# Obtener el mapa de Ibarra (Ejemplo Zona Urbana)
ibarra_map <- get_stadiamap(
  bbox = c(left = -78.1190, bottom = 0.3494,
           right = -78.1181, top = 0.3503),
  maptype = "outdoors",
  zoom = 18
)
ggmap(ibarra_map)

# Graficar el mapa y superponer los puntos de emisiones de NOx a lo largo de la

tema_ejes <- theme(
  plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 18, face = "bold"),
  axis.title.y = element_text(size = 16),
  axis.text.x = element_text(size = 9),
  axis.text.y = element_text(size = 9),
  legend.position = "bottom"
)

factor_dist <- 1

a <- ggmap(ibarra_map) +
  stat_summary_2d(
    data = df_movementsum,
    aes(x = Longitud, y = Latitud, z = EMISSIONSNOX_sum),
    fun = "sum",
    binwidth = c(0.0000566 * factor_dist, 0.0000575 * factor_dist)
  ) +
  scale_fill_stepsn(
    colors = c("#6baed6", "#08306b", "black"),
    breaks = c(0, 3, 6, 9, 12),

```

Figura 48. Extracto de código mapas de emisiones
(Autoría Propia)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en la investigación, acompañados de su respectivo análisis y discusión. En primer lugar, se presentan los resultados generales sobre el tráfico vehicular y su composición, abarcando todos los escenarios de estudio. Seguidamente, se examinan las horas con mayor incidencia de tránsito. Finalmente, se detallan los resultados de las emisiones generadas en cada escenario, estableciendo una comparación entre el viernes, día de máxima afluencia vehicular, y el sábado, caracterizado por un tráfico moderado.

4.1 Caracterización Flota Vehicular

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos sobre la composición de la flota vehicular registrada durante los distintos días y franjas horarias evaluadas, con el objetivo de identificar patrones de distribución y prevalencia de cada tipo de vehículo. Se contemplan seis categorías de vehículos principales: sedanes, SUVs, camionetas, camiones, motocicletas y busetas, las cuales fueron clasificadas en función de las observaciones realizadas en campo y los datos recabados mediante dispositivos de conteo. Los resultados se desglosan de manera específica para cada jornada de estudio, permitiendo apreciar las variaciones diarias en la presencia relativa de cada tipo vehicular, así como su comportamiento en distintos tramos horarios clave. Este análisis permite comprender no solo la demanda de volumen del tráfico, sino también la tipología de los vehículos que circulan por los corredores viales estudiados.

4.1.1 Composición de la Flota Vehicular por Escenario

En la **Figura 49** se muestra la composición de la flota vehicular para el día miércoles. A pesar de que en estas calles estudiadas no existen líneas de autobús, en la franja horaria de 6:00-07:00 se evidenció la presencia de unas pocas unidades de este tipo de vehículo, mismas que se presume se dirigen a las rutas que les corresponden. En todas las franjas horarias se muestra una clara predominancia por parte de los vehículos sedán con una distribución promedio aproximada del 50%, seguido por los tipo SUV que representan el 25%, el restante se distribuye entre el resto de los vehículos con una clara presencia de motos y camionetas con porcentajes similares. Por otro lado, en las franjas horarias de 6:00-07:00 y de 12:00-13:00 surge la presencia de busetas, que coincide con el inicio y fin de la jornada académica. En cuanto a la

comparación entre calles, los dos enlaces muestran una distribución similar con variaciones muy leves e incluso casi imperceptibles.

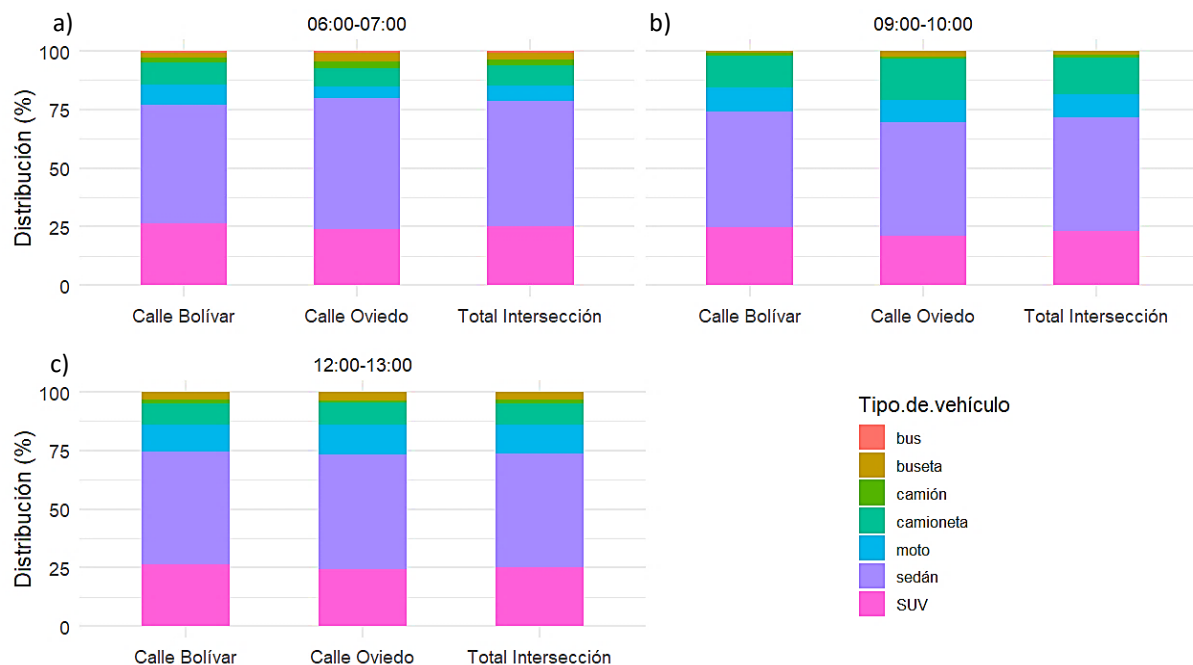


Figura 49. Composición flota vehicular día miércoles: a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00
(Autoría Propia)

En la **Figura 50** se evidencia la distribución porcentual de tipos de vehículos durante el día viernes. Al igual que en el día miércoles se logra evidenciar que los vehículos tipo sedán son los que tiene una mayor presencia con un porcentaje aproximado del 50%, seguido nuevamente por los vehículos tipo SUV que similar al miércoles también tienen un promedio aproximado del 25%; sin embargo, en este día se observa un aumento en la presencia de camionetas con un aproximado del 15% y el restante se reparten entre los otros tipos de vehículos. A diferencia del día miércoles la presencia de busetas se observa en las tres franjas horarias, aunque en mayor porcentaje se aprecia en la franja horaria de 06:00-07:00. Nuevamente en la comparación entre las dos calles, se observa que la distribución de los tipos de vehículos es muy similar entre los dos enlaces.

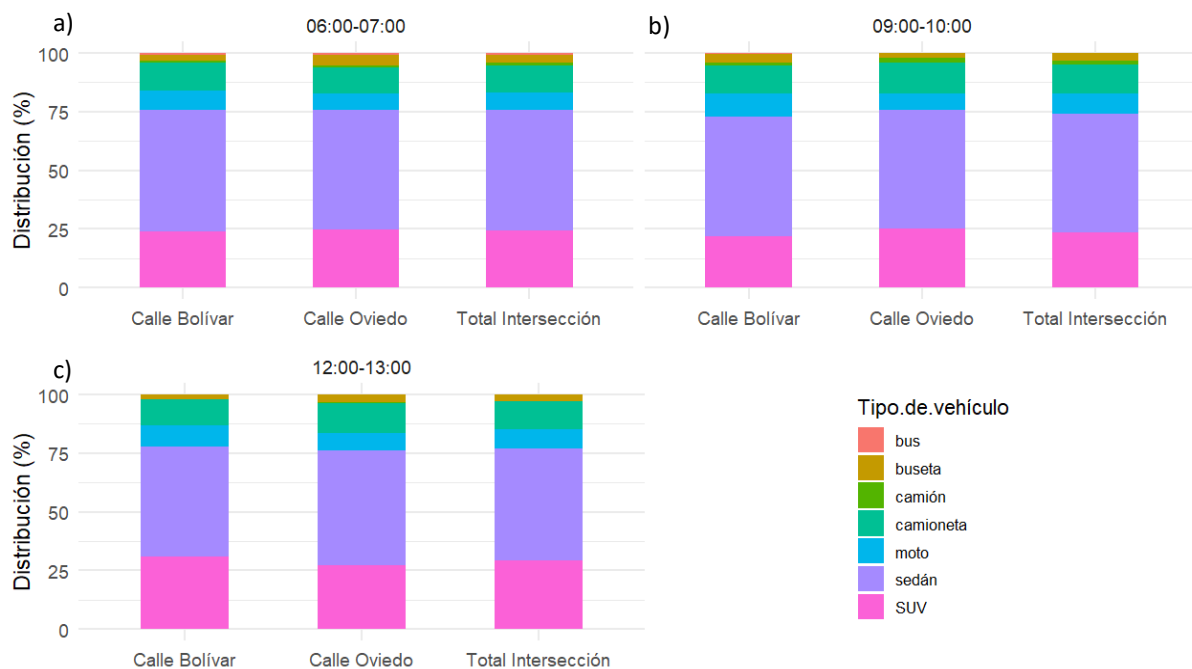


Figura 50. Composición flota vehicular día viernes: a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00
(Autoría Propia)

Por último, en la **Figura 51** se presenta la distribución porcentual de tipos de vehículos por calle durante el día sábado. A comparación con los días laborables, este día si presenta un cambio en la distribución, por ejemplo, en la mayoría de las franjas horarias desaparecen las busetas, así mismo también disminuye e incluso en ciertos momentos desaparece la presencia de camiones. Los vehículos sedán siguen predominando, sin embargo, ya no en la misma cantidad que en los días laborables, se puede observar que disminuye su porcentaje de participación. Los vehículos tipo SUV aún mantienen su posición como segundo tipo de vehículo más presente con un porcentaje levemente superior al 25%. Debido a la disminución en la intensidad de vehículos en la primer franja horaria, aunque fueron pocos los buses que transitaron se nota su presencia en comparación con los días laborales.

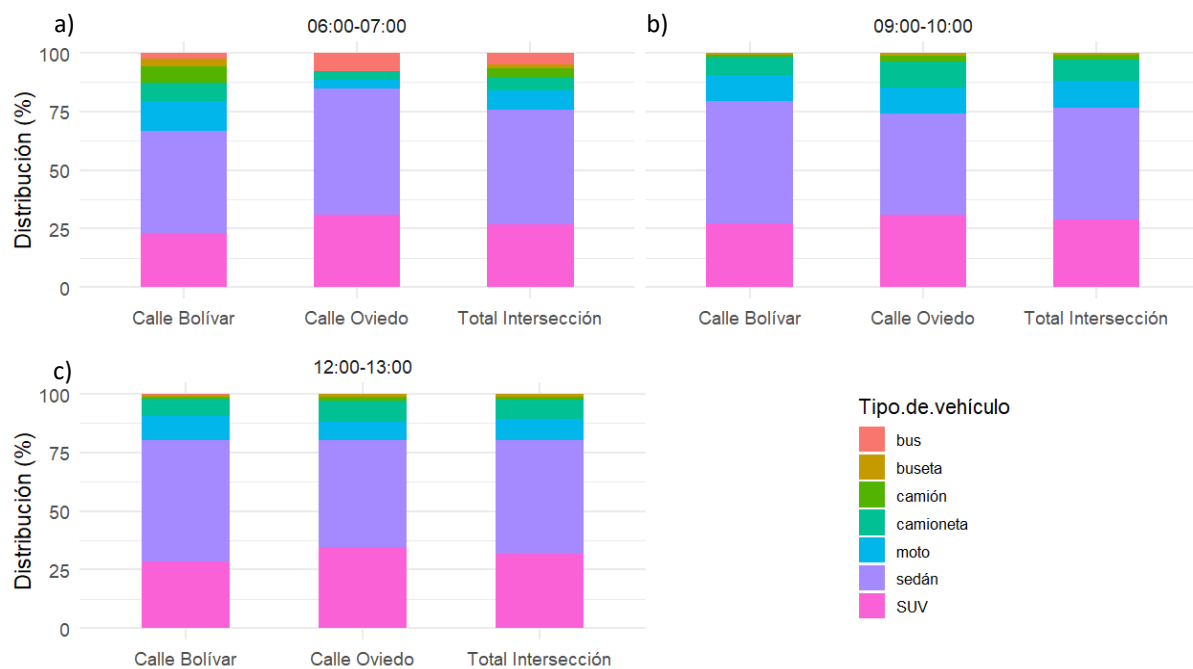


Figura 51. Composición de la flota vehicular día sábado: a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00 (Autoría Propia)

4.2 Intensidad del Tráfico Experimental

En esta sección se muestran los resultados de la intensidad del tráfico obtenidos en el área de estudio durante la campaña experimental. Se analiza la intensidad semanal y diaria para los escenarios de estudio definidos previamente en la sección 3.4.4. De igual manera se presenta los resultados de las rutas tomadas por los vehículos.

4.2.1 Intensidad Diaria

La **Figura 52** presenta los resultados de la intensidad vehicular registrados en la calle Bolívar durante la semana del 12 al 18 de mayo. Se logra observar una similitud entre los días laborables, con un promedio de 6540 vehículos diarios, lo que representa una rutina estable de desplazamientos asociados a actividades laborales, educativas y comerciales. El día viernes se muestra un ligero aumento del 7%, mismo que podría estar relacionado con un mayor movimiento previo al fin de semana, que refleja un aumento en actividades y convirtiéndose en el día de mayor intensidad vehicular de la semana. Durante el fin de semana se evidencia una reducción notable con una caída del 10% el sábado y del 40% el domingo, que representa una disminución significativa en la circulación.

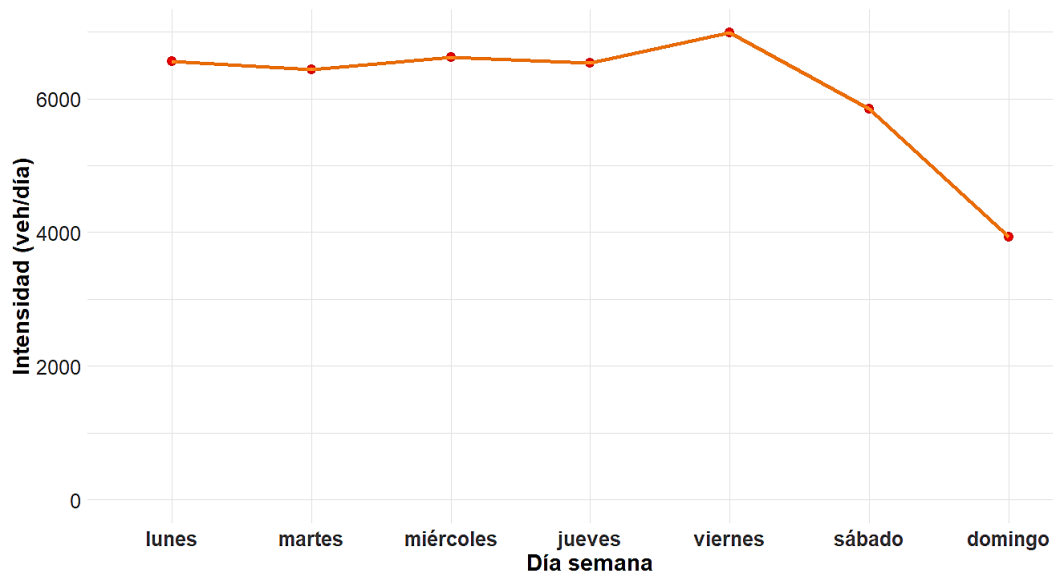


Figura 52. Intensidad diaria calle Bolívar
(Autoría Propia)

Por otro lado, la **Figura 53** presenta los valores de intensidad vehicular registrados en la calle Oviedo durante el mismo periodo de tiempo que en la figura anterior. Nuevamente, se observa una tendencia casi lineal en los días laborables de lunes a jueves con un promedio de 4391 vehículos diarios. El viernes se muestra nuevamente como el día de mayor flujo vehicular, con un incremento del 12 % respecto al promedio del resto de días laborables con más de 5000 vehículos por día transitados. De igual manera se logra presenciar la reducción en la intensidad vehicular durante el fin de semana con un 34 % el sábado y un 65 % el domingo.

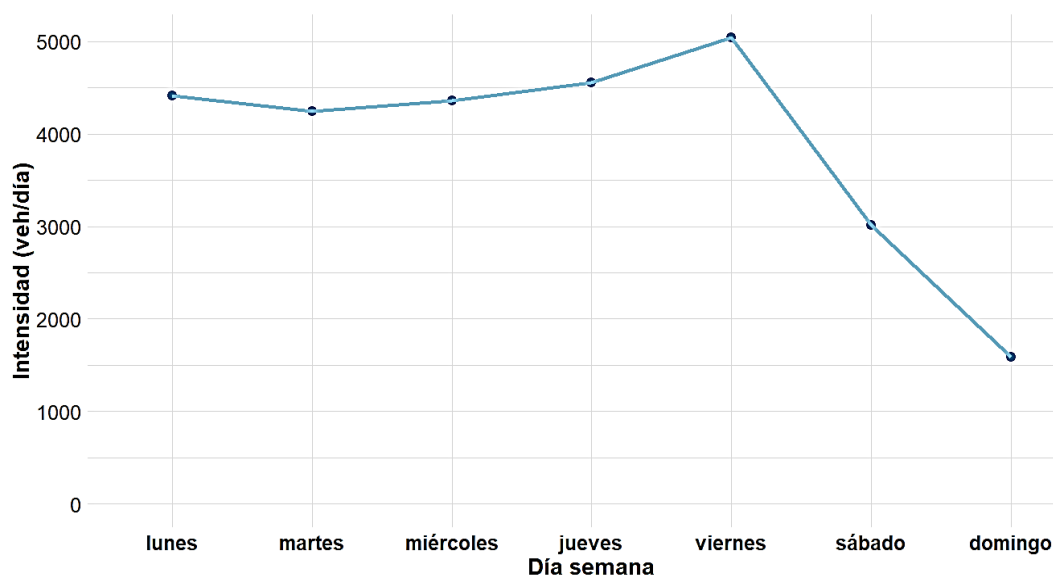


Figura 53. Intensidad diaria calle Oviedo
(Autoría Propia)

4.2.2 Intensidad Horaria por Días

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la intensidad horaria por días obtenidos a través de los dispositivos de conteo automático Dahua Access ANPR Camera para los diferentes días y franjas horarias definidas previamente en la campaña experimental, con el objetivo de identificar las tendencias de tráfico que presentan cada una de las calles que forman parte de la intersección. En los siguientes apartados, se describen los resultados para cada día de estudio, así como el análisis de estos.

4.2.2.1 Registros Día Laborable: D1. Miércoles.

La **Figura 54** corresponde a la intensidad vehicular durante el día miércoles donde se observa una clara diferencia en los patrones horarios de tráfico. En la calle Bolívar, el flujo vehicular presenta su pico máximo de intensidad de 562 veh/h y durante la mañana y tarde se presenta una tendencia que ronda entre los 410 a 480 veh/h. En la calle Oviedo se muestra que su pico máximo de intensidad es de 409 veh/h y a diferencia de la calle Bolívar, esta presenta una tendencia creciente desde las 06:00 horas. Lo que se puede evidenciar en ambas calles es que el movimiento empieza a partir de las 06:00 horas pues existe una tendencia creciente a partir de esa hora, así mismo se muestra un descenso progresivo a partir de las 17:00 horas.

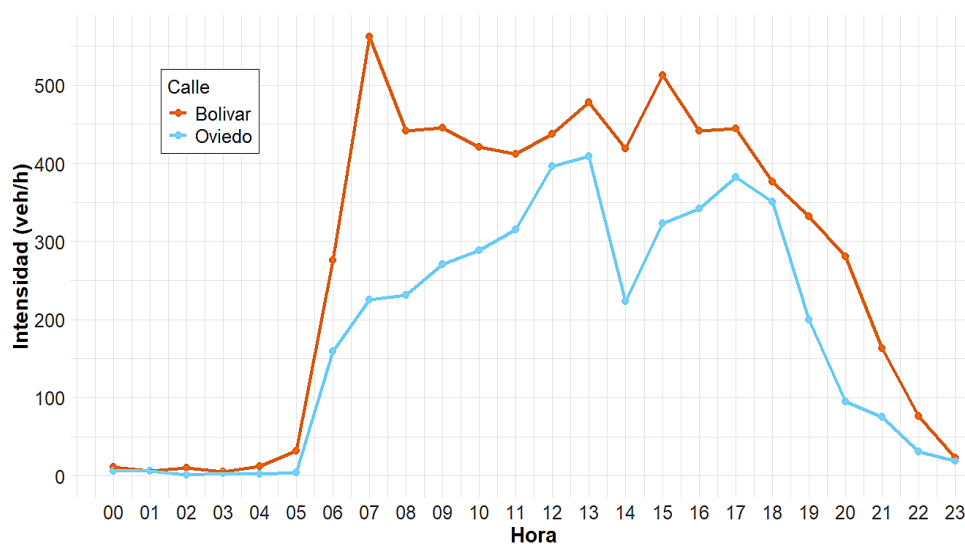


Figura 54. Intensidad horaria miércoles
(Autoría Propia)

4.2.2.2 Registros Día Laborable: D2. Viernes.

En la **Figura 55** se observa la intensidad vehicular durante el día viernes. En la calle Bolívar, se observa su pico de intensidad con 510 veh/h, posteriormente, la intensidad se mantiene elevada y relativamente constante entre la mañana y la tarde con una tendencia casi lineal que ronda entre los 401 y 460 veh/h. Por otra parte, la calle Oviedo presenta un crecimiento paulatino en la intensidad vehicular a lo largo del día, alcanzando su punto máximo de 451 veh/h y se observa un comportamiento similar al del día miércoles. Nuevamente se puede observar que el movimiento de vehículos empieza a partir de las 06:00 horas, y que empieza a decrecer progresivamente a partir de las 17:00 horas.

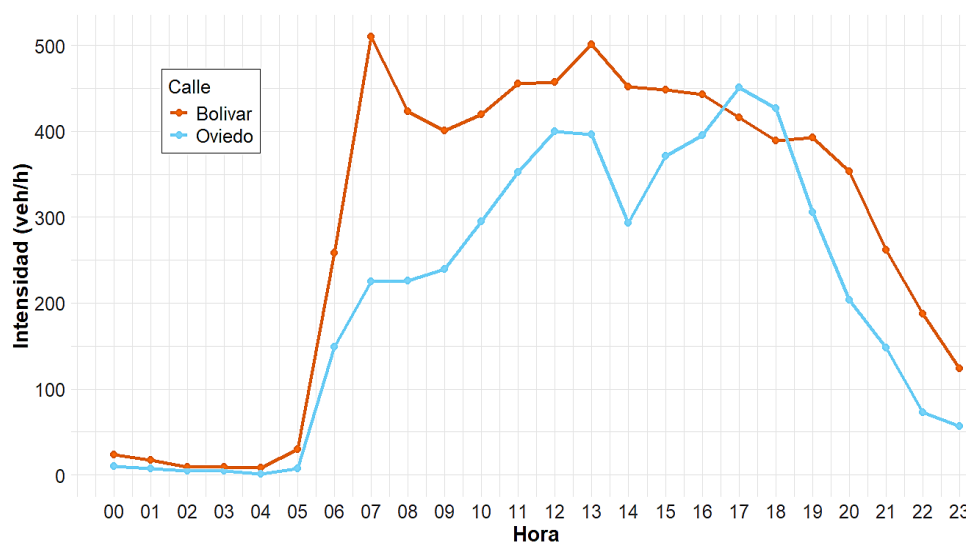


Figura 55. Intensidad horaria viernes
(Autoría Propia)

4.2.2.3 Registros Día No Laborable: D3. Sábado.

El comportamiento de la intensidad vehicular durante los días sábado se evidencia en la **Figura 56**. Ambas calles registran un incremento en la intensidad sostenido desde las 06:00 horas llegando a sus picos al medio día con una intensidad de 407 veh/h para la calle Bolívar y 274 veh/h para la calle Oviedo. Nuevamente se repite el patrón de disminución a partir de las 17:00 horas. Por otro lado, en este día si existe una diferencia en el comportamiento en comparación a los días laborables, pues no existe un comportamiento lineal o predecible, ya que existen subidas y bajadas de intensidad a lo largo del día.

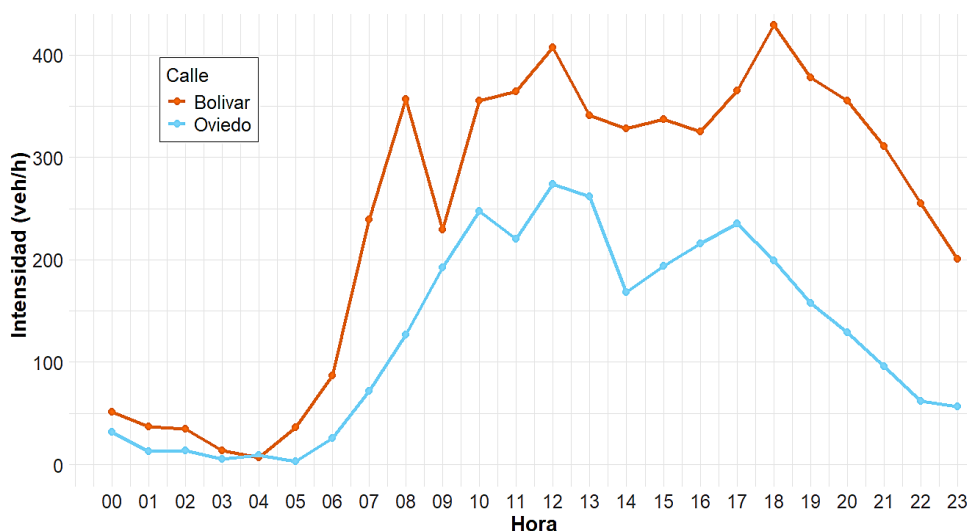


Figura 56. Intensidad horaria sábado
(Autoría Propia)

4.2.2.4 Registros Día No Laborable: D4. Domingo.

La **Figura 57** muestra la intensidad vehicular correspondiente al día domingo. Aquí se observa una clara disminución en la intensidad en comparación a los tres días expuestos previamente, así como un comportamiento completamente diferente. En la calle Bolívar se identifica un incremento progresivo desde las 06:00 horas, alcanzando un pico máximo a las 16:00 horas con 339 veh/h, seguido de una disminución paulatina hacia la noche. Por otro lado, la calle Oviedo muestra una curva de intensidad con un pico máximo más temprano a las 13:00 horas de 149 veh/h. En esta figura se nota de manera más clara una diferencia entre ambas calles, en donde, la calle Bolívar muestra superioridad en cuanto a la intensidad de vehículos que transitan.

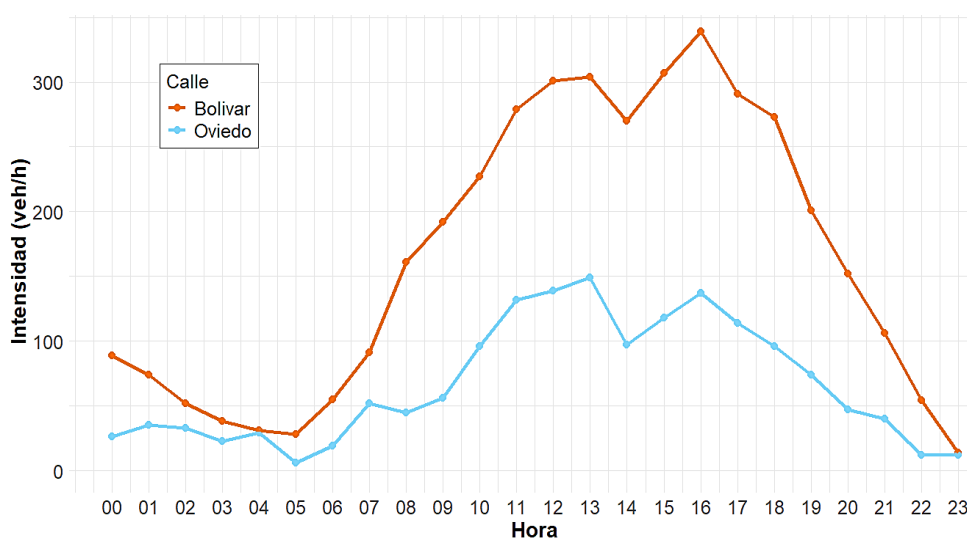


Figura 57. Intensidad horaria domingo
(Autoría Propia)

4.2.3 Distribución Trayectorias de los Vehículos

En la **Tabla 10** se presenta la distribución de las trayectorias tomadas por los vehículos en los tres horarios analizados durante el miércoles. En la primera franja horaria de 06:00-07:00 predomina el movimiento en línea recta, con un promedio del 88,2%. En la segunda franja horaria de 09:00-10:00, se observa un descenso en esta decisión, con una disminución del 15% con respecto al porcentaje anterior. Finalmente, en la tercer franja horaria de 12:00-13:00, de igual manera existe una caída en la cantidad de vehículos que van recto con una disminución del 12%.

Tabla 10. Distribución Trayectorias Miércoles

		<i>Franja Horaria</i>								
		<i>06:00 – 07:00</i>			<i>09:00 – 10:00</i>			<i>12:00 – 13:00</i>		
		<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>
Intensidad	(veh/h)	276	159	435	446	271	717	436	396	832
Continua recto	(%)	80,1	96,2	88,2	74,0	77,8	75,9	75,6	80,6	78,1
Giro intersección	(%)	19,9	3,3	11,8	26,0	22,2	24,1	24,4	19,4	21,9

(Autoría Propia)

Por otro lado, la **Tabla 11** muestra los valores de las trayectorias para el viernes. En la franja horaria de 06:00-07:00 se observó un predominio claro de la trayectoria en línea recta, con un promedio de 88,8%. En la franja horaria de 09:00-10:00 hubo un crecimiento notable de los giros elevándose un poco más del doble que en el primer escenario, lo que sugiere mayor diversificación en los destinos. La franja horaria de 12:00-13:00 se mantiene con un promedio similar de giros al del segundo escenario.

Tabla 11. Características Trayectorias Viernes

		<i>Franja Horaria</i>								
		<i>06:00 – 07:00</i>			<i>09:00 – 10:00</i>			<i>12:00 – 13:00</i>		
		<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>
Intensidad	(veh/h)	258	149	407	401	239	640	457	400	857
Continua recto	(%)	82,9	94,6	88,8	81,8	72,8	77,3	75,3	80	77,6
Giro intersección	(%)	17,1	5,3	11,2	18,2	27,2	22,7	24,7	20	22,4

(Autoría Propia)

Por último, en el caso de sábado, los valores correspondientes a las trayectorias que toman los vehículos se muestran en la **Tabla 12**. En la franja horaria de 06:00-07:00 se vuelve a observar una predominancia en la trayectoria en línea recta. A diferencia de los anteriores días, en el día sábado, tanto en la franja horaria de 09:00-10:00 como en la franja de 12:00-13:00, se mantiene la tendencia del movimiento en línea recta con un promedio aproximado del 85%.

Tabla 12. Características Trayectorias Sábado

		<i>Franja Horaria</i>								
		<i>06:00 – 07:00</i>			<i>09:00 – 10:00</i>			<i>12:00 – 13:00</i>		
		<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>	<i>Bolívar</i>	<i>Oviedo</i>	<i>Total</i>
Intensidad	(veh/h)	117	105	222	239	214	453	276	268	544
Continua recto	(%)	83,9	80,8	82,3	89,1	84,4	86,7	86,7	85	85,9
Giro intersección	(%)	16,1	19,2	17,7	10,9	15,6	13,3	13,3	15	14,1

(Autoría Propia)

4.3 Estimación Longitud de Cola

En la siguiente sección, se presentan los resultados correspondientes a la longitud de cola representadas por días obtenidos gracias a la simulación en el software VISSIM para los diferentes días y franjas horarias definidas previamente en la campaña experimental, con estos resultados se puede identificar las tendencias de tráfico que presentan las calles Bolívar y Oviedo en las tres franjas horarias de estudio. A continuación, se describen los resultados para cada día de estudio, así como el análisis de estos.

4.3.1 Registros Día Laborable: D1. Miércoles

La **Figura 58** muestra los resultados de la longitud de cola para el día miércoles en las dos calles estudiadas. En primer lugar, en la **Figura 58a** se puede observar la longitud de cola creada en la calle Bolívar durante el día miércoles, donde se aprecian valores más elevados de longitud de cola, fluctuando entre 6 y 9 vehículos, y si se omite la franja horaria de 06:00-07:00, los valores se encuentran por encima de los 6 vehículos. En contraste, en la **Figura 58b** se observa la longitud de cola de la calle Oviedo, que presenta colas más reducidas, entre 4 y 9 vehículos, sin embargo, se puede observar que en la franja horaria de 12:00-13:00 existen bastantes cambios con picos altos y bajos. Estas diferencias reflejan las características de cada vía, siendo la calle Oviedo la que tiene patrones más variables.

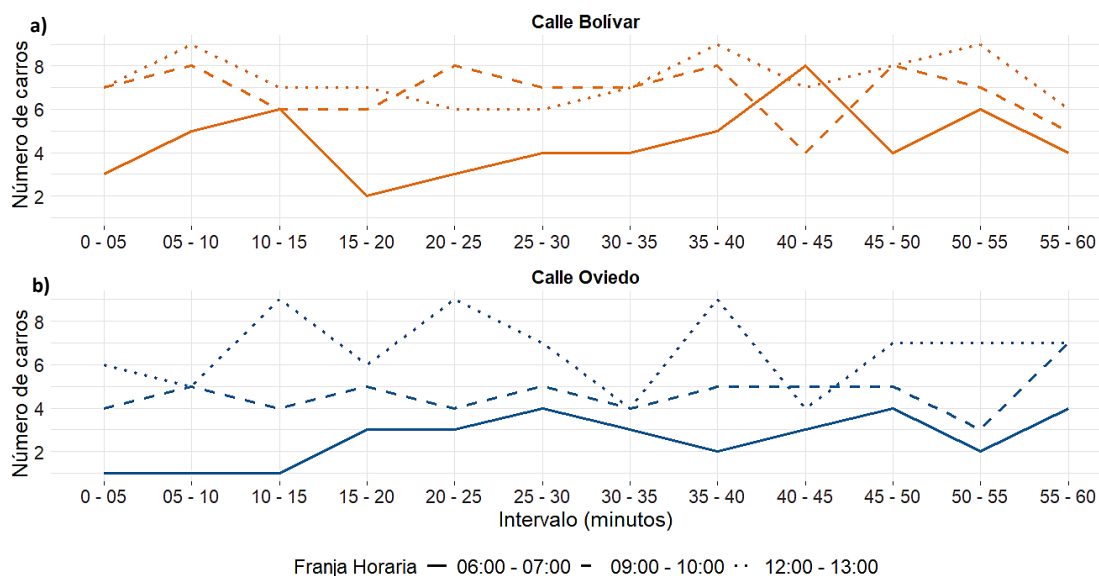


Figura 58. Longitud de cola día miércoles: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

4.3.2 Registros Día Laborable: D2. Viernes

En la **Figura 59** se observan los resultados de la longitud de cola del día viernes para las dos calles del estudio. La **Figura 59a** muestra los valores para la calle Bolívar, donde se aprecia variaciones considerables en los niveles de congestión, siendo la franja horaria de 12:00-13:00, la que presenta las colas más prolongadas con valores que llegan a superar los 10 vehículos en varios puntos del intervalo. La franja horaria de 09:00–10:00 muestra fluctuaciones moderadas con un notable despunte para el final de este escenario, mientras que de 06:00–07:00 mantiene niveles bajos y estables con pocas variaciones. En la **Figura 59b** se muestra los resultados de la calle Oviedo, aunque las colas son en general más cortas que en la calle Bolívar, también se evidencia un incremento en el escenario de mediodía, con repuntes al final del intervalo. Ambas calles presentan un patrón de comportamiento estable a lo largo del día.

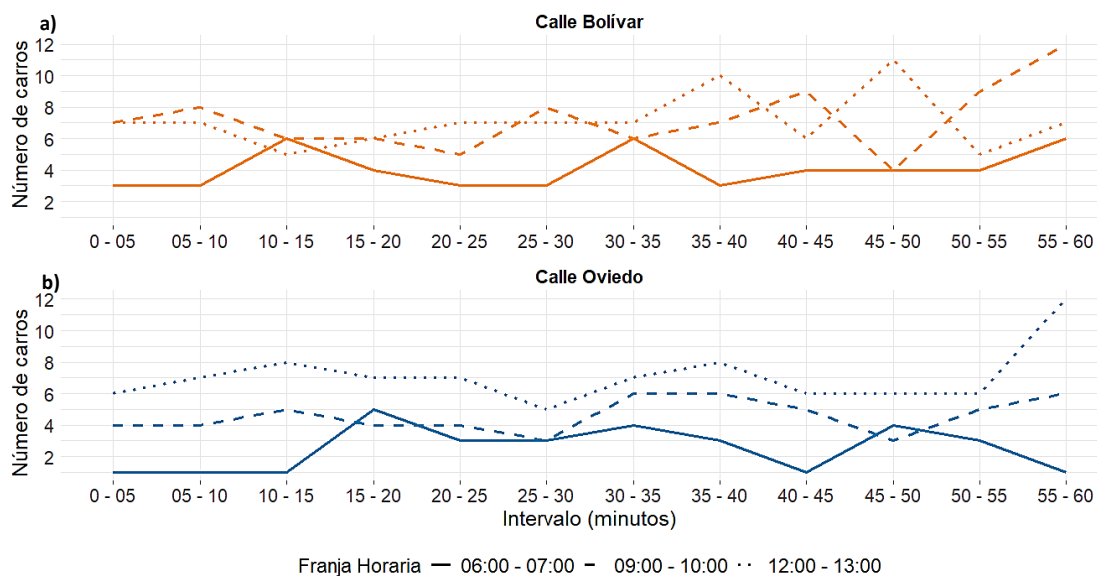


Figura 59. Longitud de cola día viernes: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

4.3.3 Registros Día No Laborable: D3. Sábado

Por último, la **Figura 60** indica los resultados de longitud de cola para el día sábado en ambas calles. La **Figura 60a** muestra las longitudes de cola del día sábado en la calle Bolívar, donde se evidencia que no existe un comportamiento estable, ya que en los tres escenarios se observa una tendencia de picos altos y bajos conforme avanza el tiempo, siendo la franja horaria de 06:00–07:00 la que presenta colas más reducidas y estables. Por su parte, en la **Figura 60b** se muestra los resultados de la calle Oviedo, donde se evidencia una tendencia similar de un patrón inestable, sin embargo, al igual que en la calle Bolívar, la franja horaria de 06:00-07:00 horas muestra una distribución más estable con menos fluctuaciones.

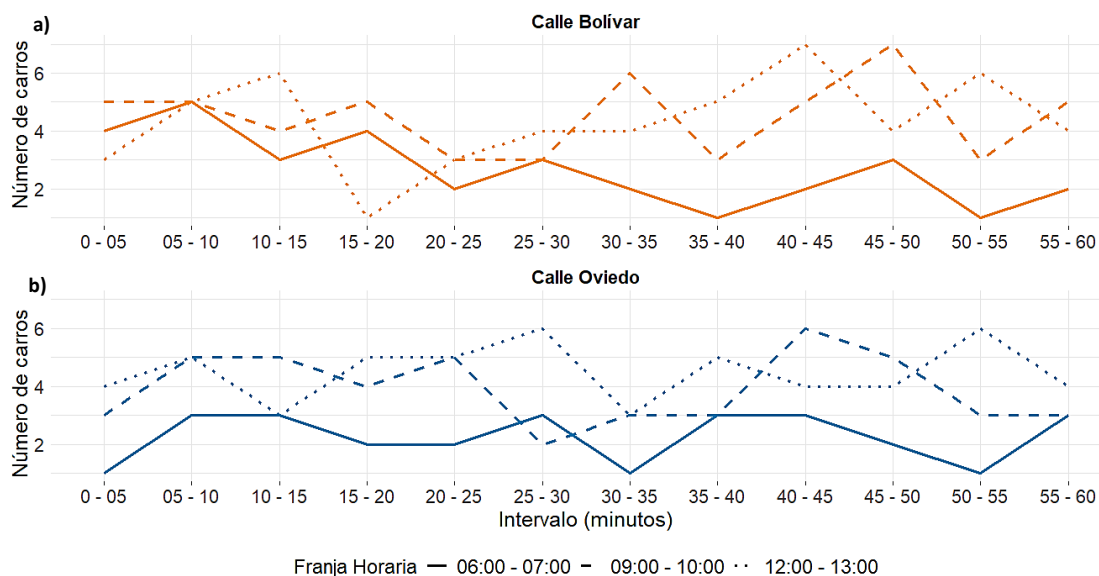


Figura 60. Longitud de cola día sábado: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

4.4 Velocidad Promedio Modelada

La **Tabla 13** muestra las velocidades promedio modeladas para los días: miércoles, viernes y sábado, en las tres franjas horarias de estudio y para ambas calles, éstas están divididas en una velocidad de aproximación a la intersección y una velocidad de salida de la intersección. Se identificaron variaciones significativas entre las condiciones de aproximación y salida, mismos que hacen referencia a la velocidad antes y después de la intersección respectivamente. Se observa que, la velocidad promedio en los tramos posteriores al semáforo supera los 44 km/h en ambas calles, mientras que en la aproximación se presentan reducciones notables de velocidad debido al semáforo con valores registrados de hasta 33 km/h como mínimo y 39,3 km/h como máximo. Esta diferencia muestra la acumulación de vehículos y su reducción en la velocidad de circulación al aproximarse al semáforo, generando condiciones de congestión. Estos patrones se repiten de forma similar en los tres días evaluados.

Tabla 13. Velocidades promedio modeladas por días y horarios

Parámetro	Calle	Condición	Miércoles			Viernes			Sábado		
			06:00	09:00	12:00	06:00	09:00	12:00	06:00	09:00	12:00
Velocidad (km/h)	Bolívar	Aproximación	35,5	34,2	34,8	37,4	34,7	33,2	39,3	35,8	35,8
		Salida	46,3	47,2	47,3	47,1	47,1	47,1	46,2	46,5	46,1
	Oviedo	Aproximación	39,3	36,5	33,6	38,5	38,1	33,4	37,5	37,5	36,7
		Salida	45,0	45,3	46,1	44,5	45,6	46,4	43,9	45,6	46,7

(Autoría Propia)

4.5 Consumo de Combustible Modelado

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al consumo de combustible estimado obtenidos con la simulación del tráfico en el software VISSIM para los distintos días y franjas horarias definidas, con el objetivo de identificar los consumos promedios generados en la intersección. Estos resultados es el consumo equivalente a la suma de las dos calles. Es importante mencionar que en la sección 4.5 los valores representados en las gráficas representan el consumo de combustible total de la intersección; es decir, el consumo de la calle Bolívar más el consumo de la calle Oviedo. A continuación, se describen los resultados para cada día de estudio, para apreciar las variaciones entre las tres franjas horarias.

4.5.1 Registros Día Laborable: D1. Miércoles

La **Figura 61** indica los resultados del consumo de combustible estimado del día miércoles en tres franjas horarias. En primer lugar, la franja horaria de 06:00–07:00 muestra una tendencia más estable, con valores inferiores a 1.5 litros. Por otro lado, en la franja horaria de 09:00–10:00, el consumo alcanza un promedio aproximado de 2 litros, representando un 30% más que la primera franja horaria. Finalmente, la franja horaria de 12:00-13:00 presenta los niveles más elevados, con picos de consumo de hasta 3 litros de combustible, valores mínimos de 2 litros y un promedio de 3,6 litros, representando un 80% más que la franja horaria de 09:00–10:00. En general, la franja horaria de 12:00-13:00 es la que incluyó escenarios de tráfico con mayor nivel de congestión.

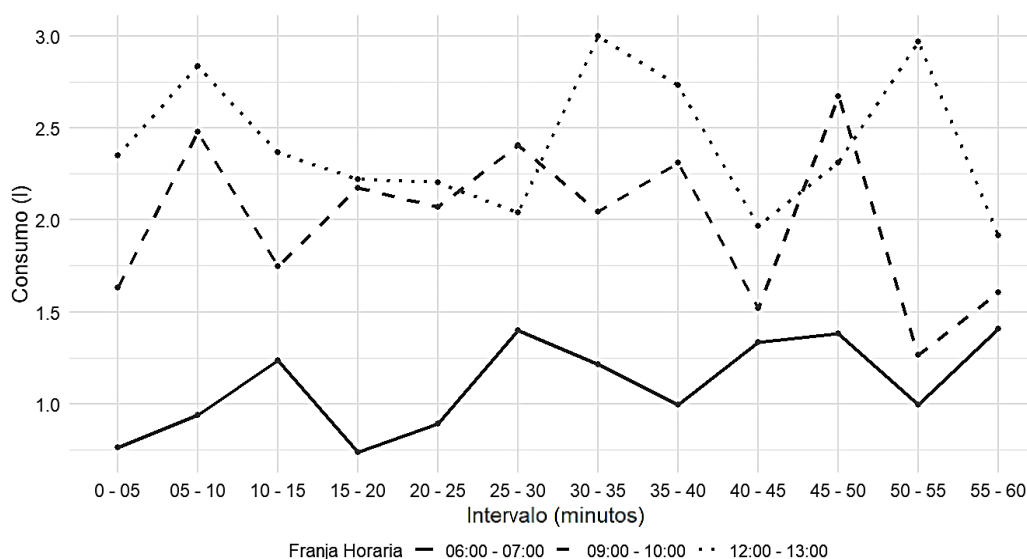


Figura 61. Consumo de combustible total intersección día miércoles
(Autoría Propia)

4.5.2 Registros Día Laborable: D2. Viernes

En la **Figura 62**, se muestra los resultados del consumo estimado de combustible para las tres franjas horarias del día viernes. En primer lugar, la franja horaria de 06:00–07:00 muestra un comportamiento estable y la media hora final presenta un patrón lineal, con consumos inferiores a los 1.5 litros. Por otro lado, la franja horaria de 09:00–10:00 presenta niveles intermedios, pero con valores muy similares al miércoles, mismos que oscilan entre 1,5 y 2,2 litros. Por último, en la franja horaria de 12:00-13:00 existen picos que sobrepasan los 3 litros de consumo de combustible. Se puede apreciar que los valores son similares a los del día miércoles.

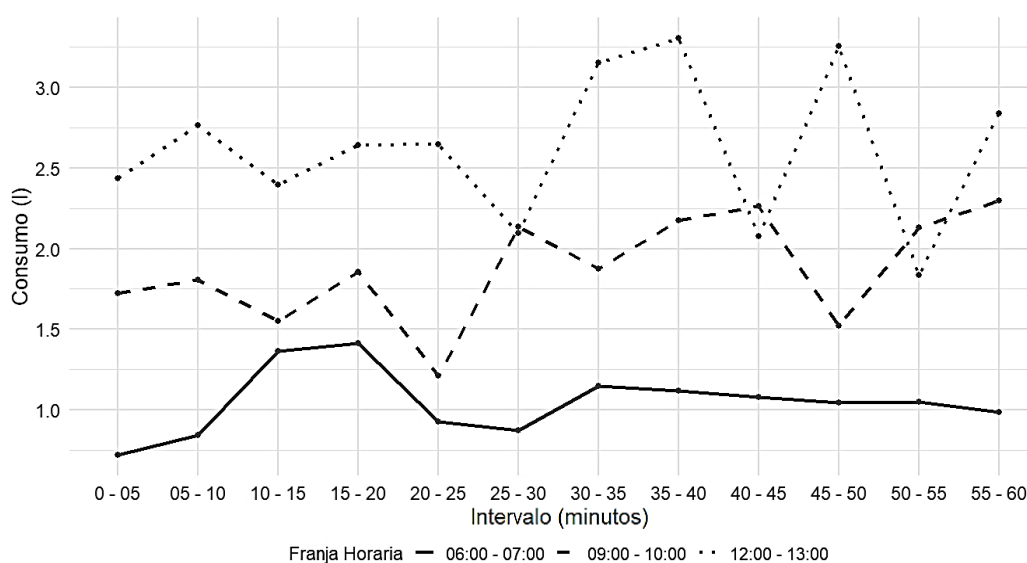


Figura 62. Consumo de combustible total intersección día viernes
(Autoría Propia)

4.5.3 Registros Día No Laborable: D3. Sábado

Por último, la **Figura 63** presenta el consumo de combustible en las franjas horarias de estudio para el día sábado. En este día se observa un cambio con respecto a los días laborables, ya que, los consumos tanto de la franja horaria de 12:00-13:00 como la de 09:00-10:00 tienen valores muy similares y sus líneas se cruzan en repetidas ocasiones, donde la franja del medio día es superior, pero de manera muy leve, debido a que, este tiene una tendencia más lineal y de 09:00-10:00 es más variable. Sin embargo, en el caso de la franja horaria de 06:00-07:00, se puede observar que sigue siendo la franja con los valores más bajos, igual a lo mencionado en los días laborables, siendo la que menos consumo posee, teniendo un promedio aproximado de 0,5 litros con un único pico de 1 litro de consumo.

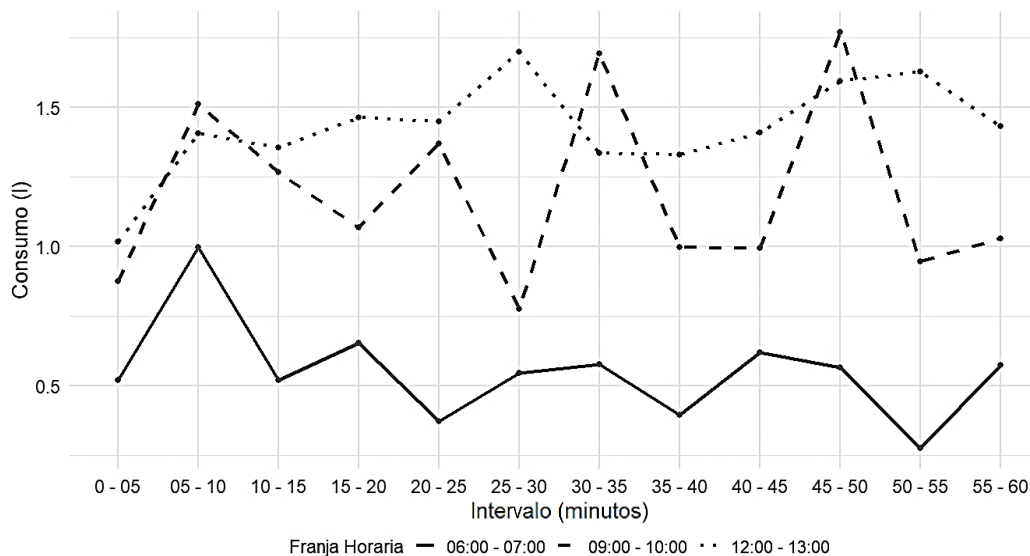


Figura 63. Consumo de combustible total intersección día sábado
(Autoría Propia)

4.6 Emisiones Modeladas

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos sobre el modelado de emisiones resultado de la simulación en el software VISSIM para los distintos días y escenarios horarios evaluados, con el objetivo de identificar los picos de emisiones que se puedan disminuir. Los resultados se desglosan de manera específica para cada día de estudio, permitiendo apreciar las variaciones entre los tres horarios.

4.6.1 Emisiones de CO y NO_x

4.6.1.1 Emisiones Estimadas Día Laborable: D1. Miércoles.

En la **Figura 64** se muestran las emisiones de CO y NO_x generadas el día miércoles, se analiza a través de intervalos de 5 minutos. Se logra observar que tanto el CO Y el NO_x comparten patrones similares en las tres franjas horarias. La franja horaria de 12:00-13:00 es la que concentra los niveles más elevados de emisiones, con valores de CO superiores a 50 g, así como, de NO_x superiores a 10 g. Por otra parte, la franja horaria de 09:00-10:00 horas tiene valores muy cercanos a los del medio día, están por debajo con un 20% aproximadamente. Por último, de 06:00-07:00 presenta los niveles de emisiones más reducidos con valores inferiores a 25 g de CO e inferiores a 5 g de NO_x, siendo la franja horaria donde se estimó un menor nivel de emisiones, similar a lo encontrado en el consumo de combustible.

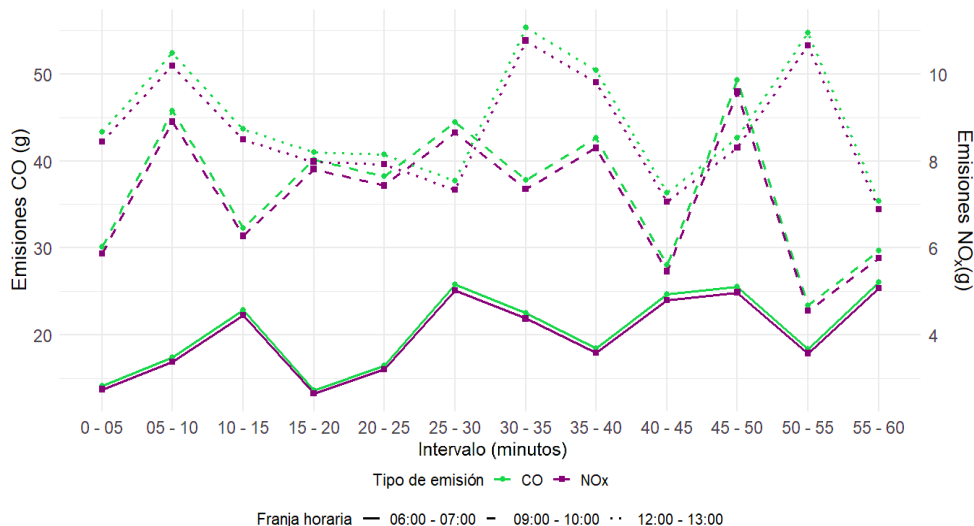


Figura 64. Emisiones de CO y NO_x día miércoles (Autoría Propia)

4.6.1.2 Emisiones Generadas día Viernes.

En la **Figura 65** se presentan las emisiones estimadas resultantes del día Viernes. En esta gráfica se observa una diferencia más marcada entre cada franja horaria, sin embargo, se destaca el hecho que al medio día es cuando existe más emisiones generadas. La franja horaria de 12:00-13:00 tiene valores que rondan los 50 g de CO con picos de hasta 60 g y valores de NO_x que rondan los 10 g con picos de 12 g. En segundo lugar, la franja horaria de 09:00–10:00 se mantiene en un punto intermedio con valores con un promedio aproximado de 35 g de CO y 7 g de NO_x. Mientras tanto, la franja horaria de 06:00–07:00 muestra una tendencia decreciente a lo largo del día con emisiones mínimas menores a 25 g de CO y 6 g de NO_x.

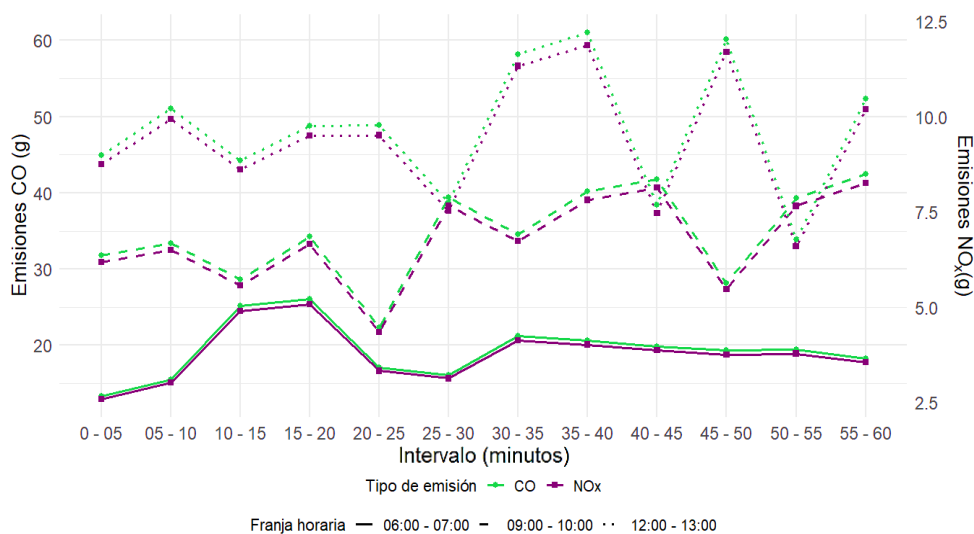


Figura 65. Emisiones de CO y NO_x día viernes (Autoría Propia)

4.6.1.3 Emisiones Generadas día Sábado.

Las emisiones de NO_x y CO para el día Sábado se muestran en la **Figura 66**. Es notable que es el día con menor cantidad de emisiones. Aquí se observa que la franja horaria de 12:00-13:00 concentra el promedio de emisiones más elevadas, con un promedio aproximado superior a los 15 g de CO y valores de NO_x superiores a los 5 g. Nuevamente se observa que de 09:00-10:00 tiene valores muy cercanos y similares a la franja horaria de 12:00-13:00 con picos altos y bajos muy variables, pero que de cierta manera en un punto llegan a ser incluso superiores a los del medio día. Mientras que la franja horaria de 06:00-07:00 muestra emisiones significativamente reducidas, con valores inferiores y más estables, con un promedio aproximado de CO de 10 g y NO_x en torno a los 2 g.

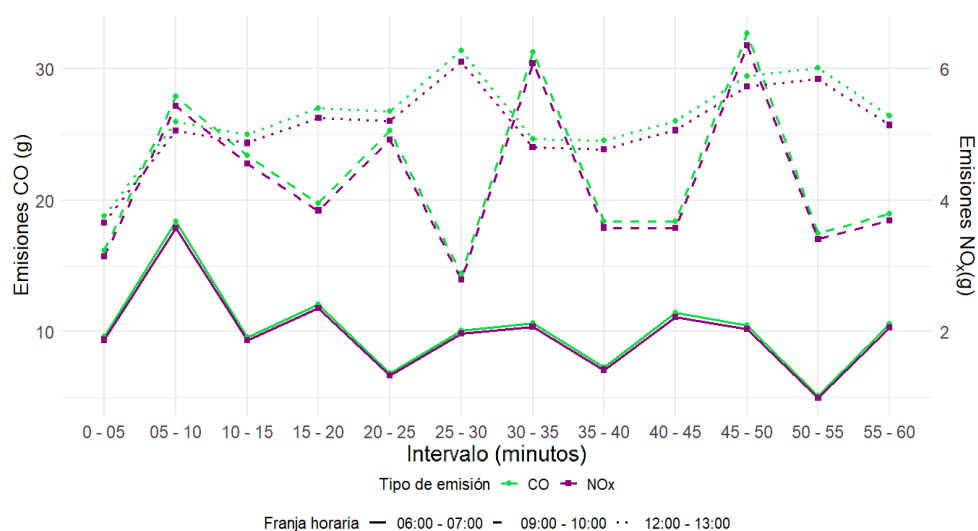


Figura 66. Emisiones de CO y NO_x día sábado
(Autoría Propia)

4.6.2 Correlación entre emisiones y consumo

La siguiente sección presenta el análisis de la relación entre el consumo de combustible y las emisiones estimadas a partir del modelado. Este análisis permite comprender el grado de influencia mutua entre ambas variables y su impacto en la caracterización del desempeño ambiental del sistema simulado. Para ello, se emplean los datos correspondientes al día con mayor intensidad de tráfico, previamente identificado como el día viernes en los resultados del análisis de demanda vehicular.

4.6.2.1 Correlación entre Consumo y emisiones de NO_x

La **Figura 67** muestra la correlación entre el consumo de combustible y las emisiones de NO_x durante las tres franjas horarias del día viernes, evidenciando una correlación positiva en cada caso. A medida que aumenta el consumo de combustible, también se incrementan las emisiones, lo que sugiere una asociación directa entre la intensidad del tráfico y las emisiones generadas. Esta tendencia se mantiene en las tres franjas horarias analizadas, sin embargo, se puede diferenciar que a medida que avanza el día la línea de correlación se vuelve más amplia para cada franja horaria, siendo la correlación de medio día la más grande. Es importante mencionar, que se observa una correlación lineal, debido a que el software estima las emisiones en base al consumo de combustible.

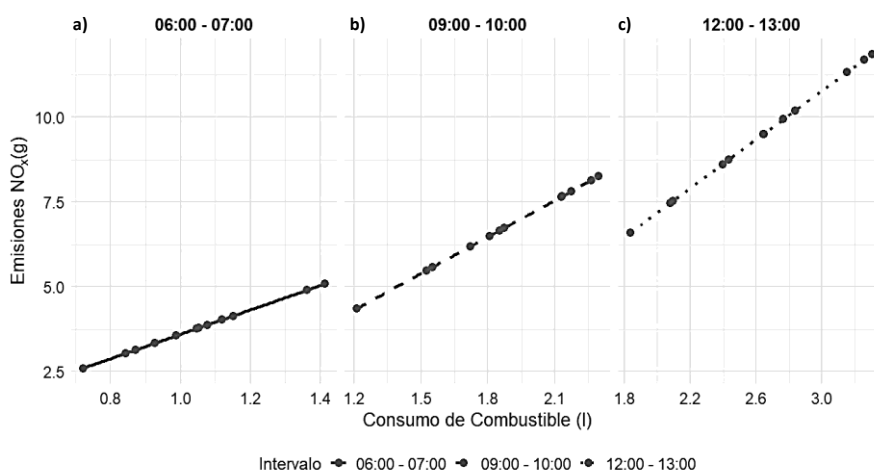


Figura 67. Correlación entre consumo y emisiones de NO_x : a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00
(Autoría Propia)

4.6.2.2 Correlación entre Consumo y emisiones de CO.

La **Figura 68** muestra la correlación entre el consumo de combustible y las emisiones de CO para las tres franjas horarias del día viernes. Se evidencia una relación positiva entre estas variables durante las tres franjas horarias. De igual manera se observa que a medida que aumenta el consumo, también lo hacen las emisiones, lo que sugiere una asociación directa entre la demanda energética del parque vehicular y su impacto ambiental. Esta correlación nos permite identificar que la franja de medio día contiene los niveles más críticos tanto de consumo de combustible como de emisiones generadas. También se observa que se repite el factor de la correlación entre el consumo y las emisiones de NO_x , pues las gráficas son idénticas.

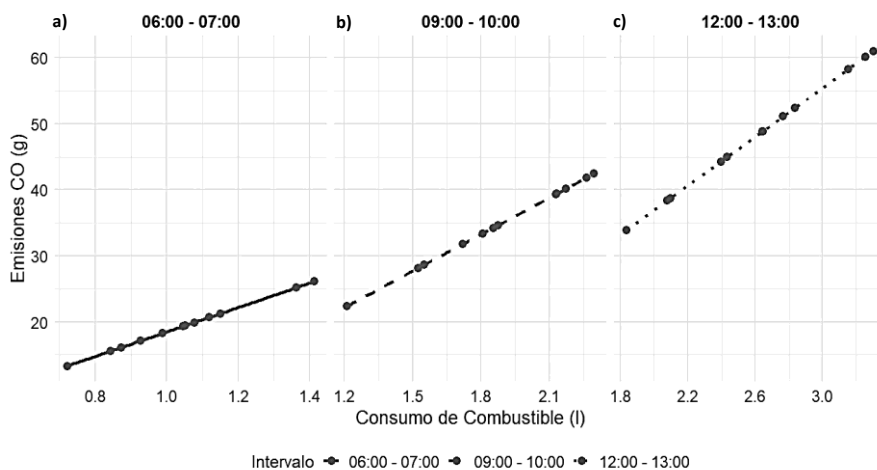


Figura 68. Correlación entre consumo y emisiones de CO: a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00 (Autoría Propia)

4.6.2.3 Correlación entre emisiones de NO_x y CO.

Por último, la correlación entre las emisiones de NO_x y CO para las tres franjas horarias estudiadas del día viernes se presenta en la **Figura 69**. Los datos vuelven a mostrar una correlación positiva en cada franja horarias; es decir, a medida que aumentan las emisiones de NO_x , también se incrementan las emisiones de CO. Este patrón es evidente considerando que en las anteriores gráficas la correlación aumentaba gradual y linealmente con el paso del día. Nuevamente en la franja horaria de 12:00–13:00, es donde se observan concentraciones elevadas de ambos contaminantes, con valores de CO que alcanzan hasta 60 g y de NO_x cerca de 12 g. En las otras franjas horarias, si bien se mantiene la correlación, los niveles son más bajos, indicando condiciones operativas más favorables desde el punto de vista ambiental.

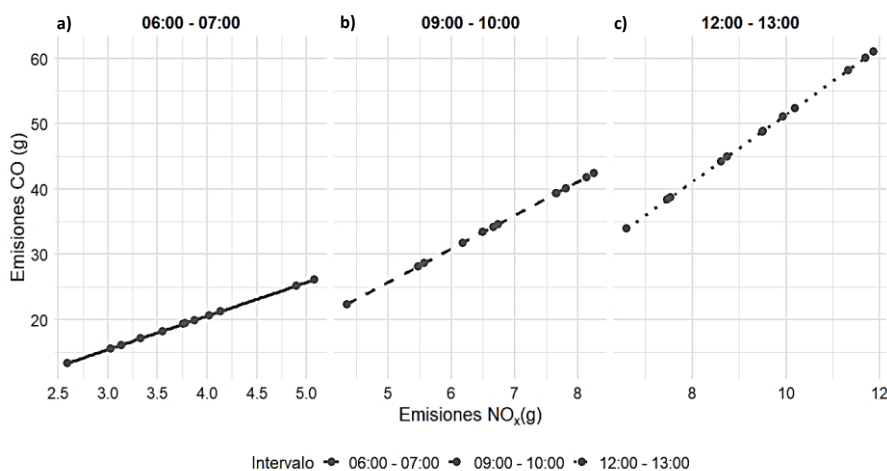


Figura 69. Correlación entre NO_x y CO: a) 06:00-07:00, b) 09:00-10:00, y c) 12:00-13:00 (Autoría Propia)

4.7 Estimación Consumo y Emisiones por escenarios de Tráfico

Es importante mencionar que para esta sección se generaron nuevos escenarios, mismos que están detallados en la sección 3.7.3, en donde se tomó el escenario más crítico a nivel de tráfico y emisiones, que es el viernes en la franja horaria de 12:00-13:00, siendo este E1: actual. Además, se añadió dos nuevos escenarios que son: E2: propuesta A y E3: propuesta B, los cuales son nuevas configuraciones en las fases de los semáforos.

4.7.1 Longitud de Cola entre Escenarios

En la **Figura 70** se muestra cómo cambia la longitud de cola conforme a las diferentes escenarios. Es importante mencionar que la longitud de cola es un indicador del nivel de congestión en la vía y de que tan bien se ha configurado el semáforo. En la **Figura 70a**, se observan colas más extensas para el escenario 2. Sin embargo, el escenario 3 aunque con algunos picos, demuestra ser el escenario más favorable, ya que es el que produce colas más reducidas, existen un aumento en tres puntos, en el intervalo de 5 a 10, de 15 a 20 y de 30 a 35, pero el resto del tiempo, la longitud de cola disminuye y lo hace de manera más grande que en la que aumenta. Por otro lado, en la **Figura 70b** el escenario 3, muestra un ligero aumento en la longitud de cola para la calle Oviedo, sin embargo, considerando su beneficio con la calle Bolívar se lo sigue considerando la mejor opción. En general, al modificar los semáforos, se puede apreciar que si bien en algunos momentos existe mayor longitud de cola, los tiempos de espera se pueden reducir, además, la longitud de cola es importante, pero también se debe analizar el consumo de combustible y las emisiones generadas que se detallan más adelante.

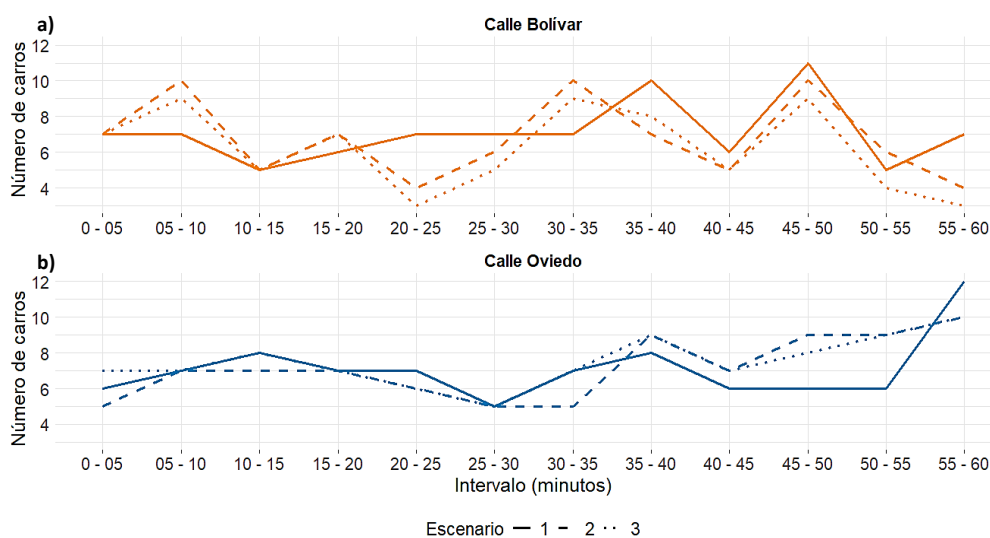


Figura 70. Longitud de cola por escenario: a) Calle Bolívar, y b) Calle Oviedo (Autoría Propia)

4.7.2 Consumo de Combustible por Escenario

En la **Figura 71** se muestra el consumo de combustible total de la intersección, es decir el consumo de la calle Bolívar más la calle Oviedo. Los resultados indican que el E1: actual presenta los mayores niveles de consumo con picos de más de 3 litros, siendo la configuración con menor eficiencia. Por otro lado, el E2: propuesta A y el E3: propuesta B, aunque en su mayoría muy parejos, se logra observar que el E2 por una leve diferencia, genera más consumo que el E3, pero sin alcanzar picos extremos como el E1. En general, el E3 es el escenario que tiene el consumo más bajo entre los tres escenarios, siendo la configuración más eficiente.

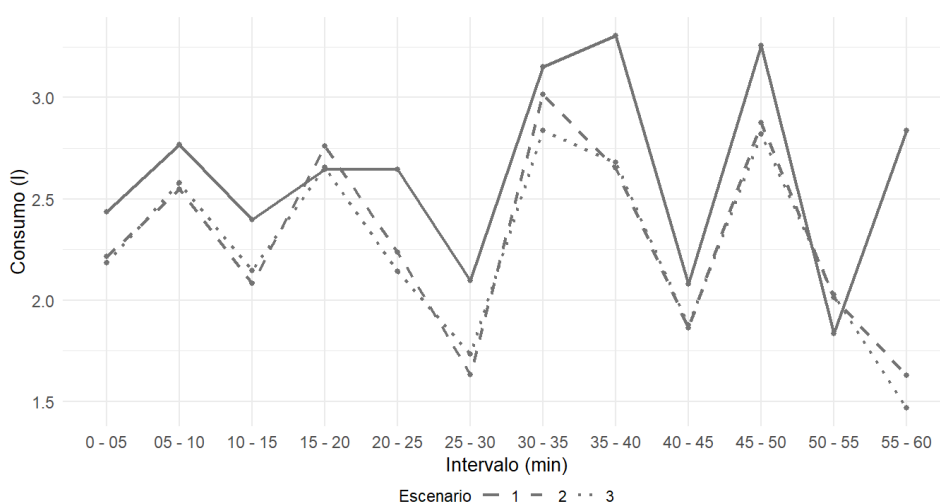


Figura 71. Consumo de combustible total intersección por escenario (Autoría Propia)

4.7.3 Emisiones de NO_x por Escenario

En la **Figura 72** se muestra los cambios en las emisiones de NO_x para los diferentes escenarios propuestos, de igual manera que en el consumo es la suma de las dos calles. Los resultados muestran que E1: actual, presenta los mayores niveles de emisión con valores superiores a los 8 gramos con valores máximos de hasta 12 gramos. E2: propuesta A y E3: propuesta B, son muy similares con valores entre 6 y 10 gramos, sin embargo, E2 genera más emisiones que E3. Por otro lado, E3 mantiene las emisiones más bajas comparado con los otros escenarios. Se puede apreciar que las emisiones tienen el mismo patrón que el consumo, validando la afirmación previa que el software genera las emisiones en base al consumo.

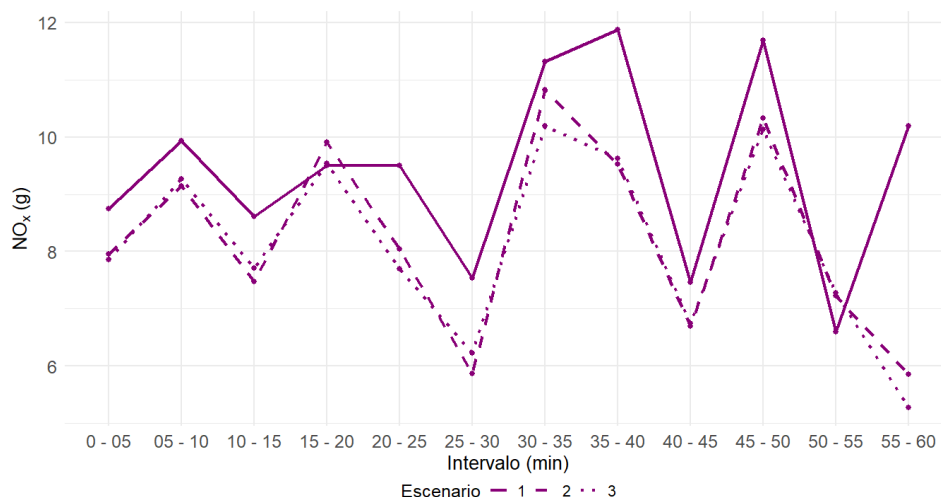


Figura 72. Emisiones de CO por escenario
(Autoría Propia)

4.7.4 Comparación entre escenarios

Este segmento presenta un resumen comparativo de los tres escenarios evaluados, con el objetivo de analizar cómo varían las emisiones en función de los cambios en la configuración semafórica. El resumen mostrado en la **Tabla 14** incluye los resultados de la velocidad, la longitud de cola, el consumo de combustible, así como las emisiones específicas de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), permitiendo una evaluación integral del impacto ambiental y operativo de cada escenario. Los resultados serán presentados a continuación:

Tabla 14. Comparación entre escenarios de tráfico

		Velocidad (km/h)	Longitud de Cola (u)	Consumo de Combustible (l)	Emisiones de CO (g)	Emisiones de NO _x (g)
E1: actual	Bolívar	40,2	85	17,2	318,1	61,9
	Oviedo	39,9	85	14,2	262,6	51,1
	Total	40,0	170	31,4	580,7	113,0
E2: propuesta A	Bolívar	42,4	81	13,1	241,8	47,0
	Oviedo	40,4	86	14,4	266,3	51,9
	Total	41,4	167	27,5	508,1	98,9
E3: propuesta B	Bolívar	44,4	74	11,7	215,5	41,9
	Oviedo	38,1	90	15,5	285,9	55,6
	Total	41,3	164	27,2	501,4	97,5

(Autoría Propia)

La **Tabla 14** presenta una comparación entre los tres escenarios de configuración semafórica. Los resultados muestran que, a medida que se implementan mejoras en la gestión del tráfico, se incrementa la velocidad promedio y se reducen tanto la longitud de cola como los emisiones

generadas. Aunque no existe una diferencia muy elevada entre E2: propuesta A y E3: propuesta B en la reducción de emisiones, el escenario E3 logra mostrar el mejor desempeño, con menor consumo de combustible y reducciones significativas en las emisiones de CO y NO_x. Estos hallazgos sugieren que E3 no solo optimiza la fluidez en el tráfico vehicular, sino que también contribuye a disminuir el impacto ambiental, convirtiéndose en la alternativa más eficiente.

En la **Figura 73**, se muestran los resultados de la velocidad, longitud de cola, consumo de combustible y emisiones de NO_x para los tres escenarios generados. Aquí se puede observar más gráficamente los resultados de la **Tabla 14**. Comparación entre escenarios de tráfico, se observa como la velocidad promedio aumenta, aunque de manera muy leve. Por otro lado, la longitud de cola si se observa cómo cambia entre cada escenario, siendo E3 el más notable, sin embargo, como se mencionó previamente, este resultado debe ser complementado con el consumo de combustible y las emisiones generadas, siendo este el caso que, aunque aumente la longitud de cola, disminuye los resultados de consumo y emisiones de NO_x.

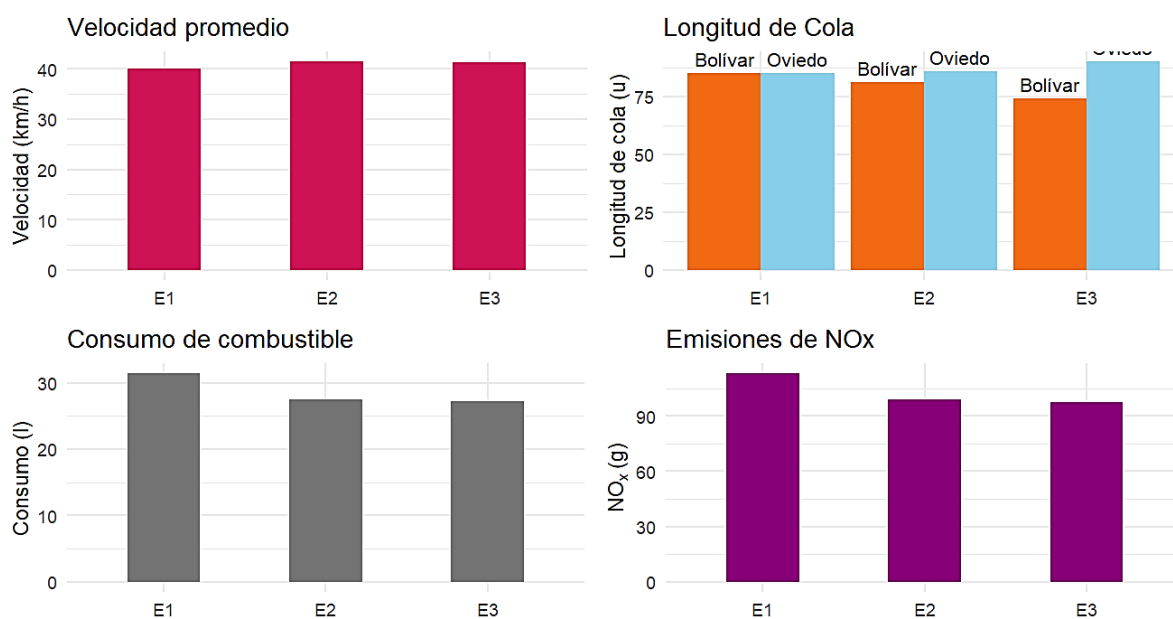


Figura 73. Comparación de resultados entre escenarios
(Autoría Propia)

4.7.5 Mapa de Consumo de Combustible entre escenarios

A continuación, se presenta un análisis detallado del consumo de combustible correspondiente al escenario operativo más desfavorable del estudio, mismo que ya se identificó en la sección 4.7. Este análisis se centra en la identificación de los puntos de mayor concentración presentes en el mapa generado, con el objetivo de caracterizar las zonas con mayor impacto ambiental.

La **Figura 74** muestra el mapa comparativo del consumo de combustible entre el escenario actual y los escenarios propuestos A y B. Se puede observar que el consumo es mayor en el escenario actual en la zona de la intersección. De igual manera se distingue un leve cambio con E2: propuesta A con una ligera disminución del consumo en la calle Bolívar y aumentándolo en la calle Oviedo. También se muestra que E3: propuesta B es la alternativa más favorable, ya que, se distribuye de manera equitativa el consumo entre la calle Bolívar y la calle Oviedo y la reducción en el consumo en general entre las dos calles.

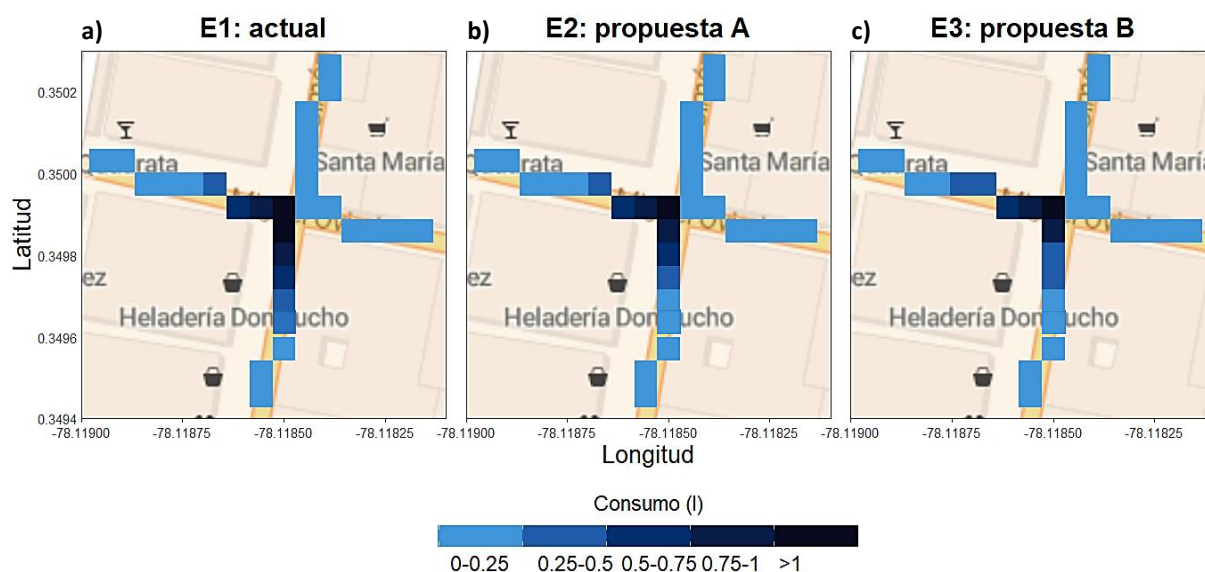


Figura 74. Mapa de consumo de combustible entre escenarios: a) Escenario actual, b) Propuesta A, y c) Propuesta B (Autoría Propia)

4.7.6 Mapa de Emisiones NO_x entre escenarios

Por último, el mapa presentado en la **Figura 75**, muestra la comparación espacial de emisiones de NO_x entre los tres escenarios de configuración semafórica y revela diferencias significativas en la distribución y concentración de contaminantes. En el escenario actual, se observan zonas con alta carga de emisiones en la intersección y parte de la calle Bolívar. La propuesta A muestra una ligera mejora en la dispersión de emisiones, reduciendo las emisiones en la calle Bolívar y aumentando en la calle Oviedo, aunque el cambio es casi imperceptible. Sin embargo, la propuesta B presenta una reducción notable en las emisiones generadas en la calle Bolívar y se nota en el cambio de color, en este escenario se distribuye de mejor manera las emisiones entre las dos calles y se reduce las emisiones como lo hemos visto en los resultados previos. Estos resultados muestran al E3: propuesta B como la alternativa más favorable.

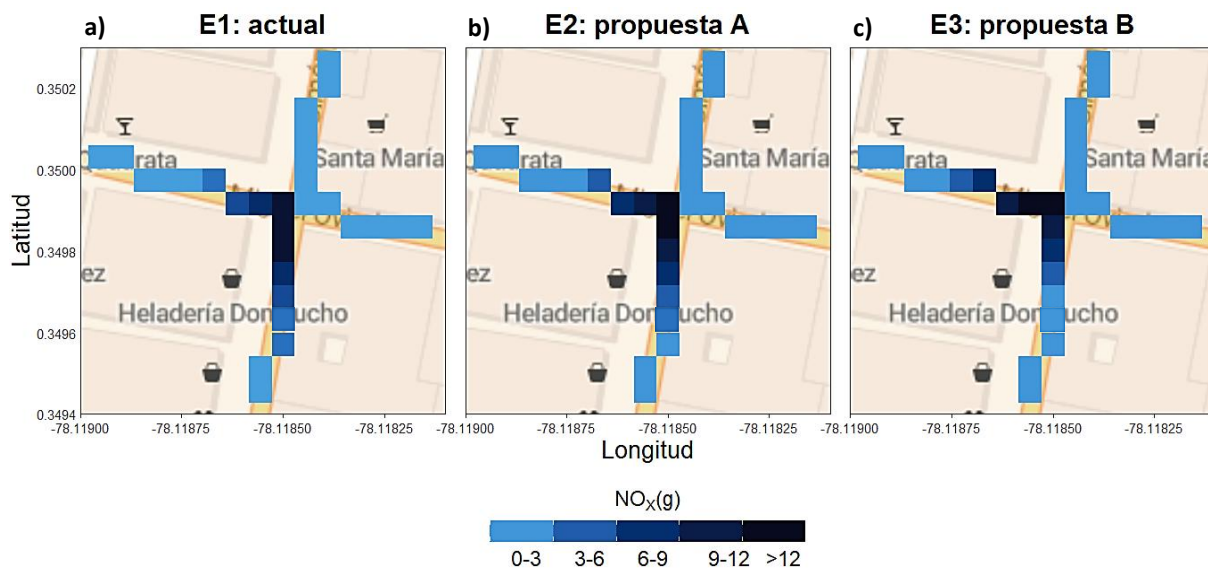


Figura 75. Mapa de emisiones NO_x entre escenarios: a) Escenario actual, b) Propuesta A, y c) Propuesta B (Autoría Propia)

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se desarrolló satisfactoriamente una revisión bibliográfica que permitió profundizar en el conocimiento sobre los fundamentos del tráfico vehicular y la congestión en la carretera, la formación de emisiones vehiculares, así como la metodología empleada para medir las variables de tráfico y los simuladores disponibles para modelar el tráfico y estimar las emisiones. Además, se realizó una revisión del estado del arte en estudios previos. La literatura señala una influencia directa entre la congestión vehicular y las emisiones generadas. Esto se logró ratificar en el estudio demostrando que existe una correlación positiva entre la longitud de cola y las emisiones generadas.
- Se instaló satisfactoriamente dos dispositivos de conteo automático Dahua Access ANPR Camera, situados uno en la calle Simón Bolívar y el otro en la calle Miguel Oviedo, estos permitieron registrar las siguientes variables, que son: el número de vehículos, el color del vehículo, la placa, el tipo, tamaño, tiempo. Muchas de estas variables fueron utilizadas en el presente estudio como datos de entrada para la simulación del tráfico y las emisiones.
- Se ejecutó una campaña experimental durante el mes abril del año 2025 en tres días distintos: Miércoles, Viernes y Sábado, los cuales tuvieron tres franjas horarias distintas: 06:00-07:00, 09:00-10:00 y 12:00-13:00, con ayuda de las cámaras se logró identificar y cuantificar las variables de tráfico: intensidad, composición. De manera manual se registró la trayectoria de cada vehículo, así como las variables de la infraestructura y las fases de los semáforos, mismas que fueron de: 43s en verde, 4s en amarillo y 47 segundos en rojo, intercaladas entre las dos calles.
- Mediante el uso del software PTV VISSIM, se desarrolló una simulación del tráfico y estimación de las emisiones generadas en el área de estudio empleando los datos recopilados en la campaña experimental, esta simulación se configuró con un periodo de tiempo de 3600s con una recopilación de resultados en intervalos de 5min, de igual manera se configuró la fecha y la hora en la que se realizó la campaña experimental. De igual manera, se crearon nuevos escenarios de tráfico que permitan optimizar y mejorar la congestión vehicular, obteniendo como resultado una disminución en las emisiones generadas, así como en el consumo de combustible y un aumento en la velocidad de los

vehículos. Esto se pudo complementar con la ayuda del software estadístico de código abierto RStudio, el cual nos ayudó en el procesamiento de los datos obtenidos previamente, así como un procesamiento de los datos obtenidos en el simulador.

- La simulación y procesamiento de los datos permitió observar que la intensidad vehicular diaria de ambas calles tiene un patrón similar con una tendencia lineal en los días laborales, un pequeño aumento en el día viernes de transición y una posterior reducción hacia los fines de semana, también se puede apreciar que la relación existente en la intersección tiene una participación de 60% de vehículos que transitan por la calle Bolívar y 40% en la calle Oviedo. Por otro lado, en la intensidad horaria de cada día se observa que ambas calles tienen un patrón de comportamiento diferente, la calle Bolívar tiene una tendencia lineal; por su parte la calle Oviedo tiene una tendencia más variable con picos máximos y mínimos. Para el fin de semana, ambas calles tienden a tener picos máximos y mínimos.
- La simulación con los escenarios propuestos permitió evidenciar variaciones significativas en las emisiones vehiculares como se demostró en la tabla final. Entre las variables analizadas, la intensidad del tráfico y la longitud de cola son determinantes en la generación de emisiones vehiculares. Las propuestas en la configuración de los semáforos muestran cambios significativos: el consumo de combustible la cantidad de emisiones generadas tuvieron una reducción del 13,5%. Estos resultados demostraron que una correcta configuración de los semáforos puede ayudar significativamente en la reducción de la congestión vehicular y de las emisiones vehiculares.

5.2 Recomendaciones

- El presente estudio no tomó en cuenta los factores necesarios para la calibración del software de simulación. Por ello, se recomienda profundizar en la metodología de la calibración para los softwares de simulación y modelado de emisiones y analizar el efecto de factores como el parqueo de vehículos, el cambio de carril, el clima, entre otros.
- Se recomienda emplear todas las funciones que ofrecen los dispositivos de conteo automático Dahua Access ANPR Camera, no solo el volumen de tráfico y tipo de vehículo, sino también funciones como el cambio de carril, los vehículos estacionados, el color, la placa, el tamaño de los vehículos. La implementación de estas funciones en futuros trabajos puede contribuir a una simulación más precisa y una estimación de emisiones más exacta. De igual manera, se puede utilizar la otra opción de cámara que se presentó en este estudio, ya que esta opción tiene funciones más avanzadas que permitiría configurar de mejor manera los simuladores.
- De igual manera, se sugiere explorar más a fondo el uso y las funciones que ofrece el software PTV VISSIM, ya que, es un software bastante completo utilizado en varios países para realizar simulaciones a una escala más grande como un nivel meso e identificar zonas de altos niveles de emisiones y optimizar los dispositivos de control de tráfico o buscar soluciones que mejoren la circulación de vehículos.
- Para futuras investigaciones, se sugiere emplear dispositivos que ayuden a medir las emisiones generadas en el área de estudio durante el tiempo de la investigación, para poder validar las emisiones estimadas. O a su vez implementar un software especializado únicamente en el modelado de emisiones y utilizar los perfiles cinemáticos que brinda PTV VISSIM para obtener resultados de emisiones más exactas.

Referencias

- Aguayza, S., & Quintuña, J. (2020). *Análisis del funcionamiento de un motor de encendido por compresión mediante diferentes porcentajes de diésel-butanol para la determinación del comportamiento de potencia y emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18789>
- Ahmed Alkaisi, Z. (2024). Traffic congestion evaluation of urban streets based on fuzzy inference system and GIS application. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(6), 102725. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102725>
- Al-Msari, H., Koting, S., Ahmed, A., & El-shafie, A. (2024). Review of driving-behaviour simulation: VISSIM and artificial intelligence approach. *Heliyon*, 10(4), e25936. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E25936>
- Arciniegas, O. (2018). *Estimación de emisiones contaminantes de vehículos de transporte escolar e institucional en la ciudad de Ibarra mediante modelado computacional*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8355>
- Arroyo, E., Cevallos, A., Imbaquingo, R., & Melo, J. (2021). Study of the effect of altitude on the emissions of exhaust gases in spark-ignition engines. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 148–162. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.629.25>
- Bahmankhah, B., Macedo, E., Fernandes, P., & Coelho, M. (2022). Micro driving behaviour in different roundabout layouts: Pollutant emissions, vehicular jerk, and traffic conflicts analysis. *Transportation Research Procedia*, 62, 501–508. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2022.02.062>
- Bogaerts, T., Masegosa, A., Angarita, J., 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>
- Buitrón, E., & Trujillo, K. (2023). *Estimación de emisiones de vehículos automotores a través de la metodología "Mobiliseyourcity" para la ciudad de Ibarra*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13947>
- Cal, R., & Cárdenas, J. (2018). *Ingeniería de tránsito : fundamentos y aplicaciones*.
- Elkafoury, A., Negm, A., Bady, M., & Aly, M. (2015). Modeling Vehicular CO Emissions for Time Headway-based Environmental Traffic Management System. *Procedia Technology*, 19, 341–348. <https://doi.org/10.1016/J.PROTCY.2015.02.049>
- Frutuoso, F., Alves, C., Araújo, S., Serra, D., Barros, A., Cavalcante, F., Araújo, R., Policarpo, N., & Oliveira, M. (2023). Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol/gasoline blends along an urban corridor: A case of Fortaleza/Brazil. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(2), 447–459. <https://doi.org/10.1016/J.IJTST.2022.04.001>
- Fung, P., Al-Jaghbeer, O., Pirjola, L., Aaltonen, H., & Järvi, L. (2023). Exploring the discrepancy between top-down and bottom-up approaches of fine spatio-temporal vehicular CO2 emission in an urban road network. *Science of The Total Environment*, 901, 165827. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165827>

- García, Á. (2016). *Understanding how to reduce road transport emissions : modelling the impact of eco-driving*. <https://doi.org/10.20868/UPM.THESIS.40634>
- García, R. (2001). *COMBUSTION Y COMBUSTIBLES*.
- Gerardo, L., Vela, S., De Jesús, M., Gallegos, F., Flores, O., José, C., Hernández, R., David, J., Vega, V., Eliseo, M., & Acevedo, C. (2019). *REVISIÓN DE LA NORMATIVA INTERNACIONAL SOBRE LÍMITES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS DE CARRETERA*.
- Guevara, M., Petetin, H., Garatachea, R., López, F., Oliveira, K., Enciso, S., Jorba, O., & Pérez, C. (2022). *Actividades de modelización de emisiones y calidad del aire enfocadas al diseño de recomendaciones preliminares para la mitigación del ozono en España*. <https://hdl.handle.net/2117/390455>
- Hasan, U., Whyte, A., & AlJassmi, H. (2022). A Microsimulation Modelling Approach to Quantify Environmental Footprint of Autonomous Buses. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(23), 15657. <https://doi.org/10.3390/su142315657>
- Heni, L., Haj-Salem, H., Lebacque, J., & 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>
- Ho, C., Lv, Z., Peng, J., Zhang, J., Choe, T., Zhang, Q., Du, Z., & Mao, H. (2023). Optical properties of vehicular brown carbon emissions: Road tunnel and chassis dynamometer tests. *Environmental Pollution*, *320*, 121037. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2023.121037>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013a). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 202:2000*. <https://drive.google.com/file/d/16Nv2dObPtOcZ9SB7-FkCuo1K0Z6A2qzb/view>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013b). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 203:2000*. <https://drive.google.com/file/d/1CVsr240G6OraMan1jcCvwJRsvhKKTfdt/view>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2017). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 204:2002*. <https://drive.google.com/file/d/10VbpDAJgscvHonci3I0yU2ti8KRskXYT/view>
- Jääntti, H., Jonk, S., Gómez Budia, M., Ohtonen, S., Fagerlund, I., Fazaludeen, M. F., Aakko-Saksa, P., Pebay, A., Lehtonen, Š., Koistinaho, J., Kanninen, K. M., Jalava, P. I., Malm, T., & Korhonen, P. (2024). Particulate matter from car exhaust alters function of human iPSC-derived microglia. *Particle and Fibre Toxicology*, *21*(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00564-y>
- Kan, Z., Liu, D., Yang, X., & Lee, J. (2024). Measuring exposure and contribution of different types of activity travels to traffic congestion using GPS trajectory data. *Journal of Transport Geography*, *117*, 103896. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGE.2024.103896>
- Kawsar, S., Biswas, S., Noor, M., & Mamun, M. S. (2024). Investigating the applicability of COPERT 5.5 emission software in Bangladesh and developing countrywide vehicular emission inventories. *Environmental Science: Atmospheres*, *4*(1), 57–72. <https://doi.org/10.1039/D3EA00047H>
- Korakianitis, T., Namasivayam, A., & Crookes, R. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, *37*(1), 89–112. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2010.04.002>

- Koziel, S., Pietrenko-Dabrowska, A., Wojcikowski, M., & Pankiewicz, B. (2024). Field calibration of low-cost particulate matter sensors using artificial neural networks and affine response correction. *Measurement*, *230*, 114529. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2024.114529>
- Kumar, P., Lekhana, P., Tejaswi, M., & Chandrakala, S. (2021). Effects of vehicular emissions on the urban environment- a state of the art. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 6314–6320. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.10.739>
- Lala, M., Taiwo, A., Lawal, H., Adesina, O., & Igbafe, A. (2024). Particulate matter pollution over artisanal crude oil refining areas of Niger-Delta Nigeria: Spatiotemporal analysis, transport modelling and risk assessment. *Ain Shams Engineering Journal*, *15*(4), 102654. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2024.102654>
- Lee, C., Tran, M., Tan, B., Scribano, G., & Chong, C. (2021). A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol. *Fuel*, *288*, 119749. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119749>
- León, P., & Piña, C. (2018). *Predicción de emisiones contaminantes de gases de escape a través de la presión media efectiva empleando redes neuronales en motores de encendido provocado*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15998>
- León, W., & Morocho, C. (2012). *Elaboración de bancos didácticos funcionales de motores de encendido provocado*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2075>
- Maldonado, L., Zuriaga, P., María, A., Torregrosa, C., & Javier, F. (s/f). *Variables Fundamentales del Tráfico: Intensidad, Velocidad y Densidad Apellidos, nombre*.
- Manthirikul, S., Amshala, V., & Jain, U. (2023). Modeling vehicular and pedestrian delays at signalized midblock crosswalk under mixed traffic conditions. *Transportation Letters*, *15*(1), 62–75. <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.2019487>
- Marcillo, J. (2020). *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*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10923>
- Martin, I., Lemus, L., Mezher, A., & Aguilar, M. (2024). Markov-reward based estimation of the idle-time in vehicular networks to improve multimetric routing protocols. *Vehicular Communications*, *49*, 100823. <https://doi.org/10.1016/J.VEHCOM.2024.100823>
- Meo, S., Salih, M., Alkhalifah, J., Alsomali, A., & Almushawah, A. (2024). Environmental pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO₂), Sulfur dioxide (SO₂), and Ozone (O₃) impact on lung functions. *Journal of King Saud University - Science*, *36*(7), 103280. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2024.103280>
- Moberg, M., Hamilton, E., Zeng, S., Bryazka, D., Zhao, J., Feldman, R., Abate, Y., Abbasi-Kangevari, M., Abdurehman, A., Abedi, A., Abu-Gharbieh, E., Adepoju, A., Adnani, Q., Afzal, S., Ahmad, S., Ahmed, D., Ahmed, H., Alem, D., Al-Gheethi, A., ... Chu, D. T. (2023). Global, regional, and national mortality due to unintentional carbon monoxide poisoning, 2000–2021: results from the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Public Health*, *8*(11), e839–e849. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00185-8)

- Moses-DeBusk, M., Storey, J., Lewis, S., Maggie Connatser, R., Mahurin, S., Huff, S., Thompson, C., & Park, Y. (2023). Detailed hydrocarbon speciation and particulate matter emissions during cold-start from turbocharged and naturally aspirated trucks. *Fuel*, 350, 128804. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128804>
- Mozo, J. (2011). *Análisis de Capacidad y Nivel de Servicio de Segmentos Básicos de Autopistas, Segmentos Trenzados y Rampas de acuerdo al Manual de Capacidad de Carreteras HCM2000 aplicando MathCad*. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/417>
- Mozo, J. (2012). *Análisis de nivel de servicio y capacidad de segmentos básicos de autopistas, segmentos trenzados y rampas de acuerdo al manual de capacidad de carreteras HCM2000 aplicando MATHCAD*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/417>
- Muñoz, M., & Rovira, A. (2015). *Motores de combustión interna*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://elibro.net/es/lc/unad/titulos/48846>
- Nesamani, K., Chu, L., McNally, M., & Jayakrishnan, R. (2007). Estimation of vehicular emissions by capturing traffic variations. *Atmospheric Environment*, 41(14), 2996–3008. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2006.12.027>
- Ortolani, A., Yeadon, J., Ruane, B., Paul, M., & Campobasso, S. (2024). Numerical and experimental analysis of the formation of nitrogen oxides in a non-premixed industrial gas burner. *Results in Engineering*, 23, 102392. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102392>
- Oskarbski, J., & Biszko, K. (2023). Estimation of Vehicle Energy Consumption at Intersections Using Microscopic Traffic Models. *Energies*, 16(1), 233. <https://doi.org/10.3390/en16010233>
- Palomares, J. (s/f). *Combustión*. Recuperado el 28 de junio de 2024, de <https://es.slideshare.net/slideshow/combustin-23673468/23673468#7>
- Pang, J., An, L., & Shen, S. (2023). Gasoline prices, traffic congestion, and carbon emissions. *Resource and Energy Economics*, 75, 101407. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2023.101407>
- Pasquale, C., Sacone, S., Siri, S., & Ferrara, A. (2019). Traffic control for freeway networks with sustainability-related objectives: Review and future challenges. *Annual Reviews in Control*, 48, 312–324. <https://doi.org/10.1016/J.ARCONTROL.2019.07.002>
- Pérez, A., López, G., & Camacho, J. (2018). *Relaciones entre magnitudes fundamentales del tráfico*. https://www.europeana.eu/es/item/355/https___hispana_mcu_es_lod_oai_riunet_upv_es_10251___102643_ent0
- Pérez, F. (2017). *Traffic solutions for greener and cleaner cities*. <https://doi.org/10.20868/UPM.THESIS.47653>
- Pérez, F., Bautista, A., Salazar, M., & Macias, A. (2014). Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico. *DYNA*, 81(184), 36–40. <https://doi.org/10.15446/DYNA.V81N184.38650>
- Perugu, H. (2019). Emission modelling of light-duty vehicles in India using the revamped VSP-based MOVES model: The case study of Hyderabad. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 68, 150–163. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.01.031>

- Potosí, E. (2023). *PLAN-DE-DESARROLLO-Y-ORDENAMIENTO-TERRITORIAL-2023-2027-CANTON-IBARRA*.
- PTV Group. (2025). *PTV Vissim*. <https://www.ptvgroup.com/es/productos/ptv-vissim>
- PUEC. (2022). *Expertos de la UNAM combinan modelos de microtráfico y simuladores vehiculares para medir las emisiones de los vehículos en el tráfico*. <https://www.puec.unam.mx/index.php/component/content/article/2196-expertos-de-la-unam-combinan-modelos-de-microtrafico-y-simuladores-vehiculares-para-medir-las-emisiones-de-los-vehiculos-en-el-trafico.html?catid=57&Itemid=101>
- Qaddoura, R., Younes, M., & Boukerche, A. (2024). Towards optimal tuned machine learning techniques based vehicular traffic prediction for real roads scenarios. *Ad Hoc Networks*, 161, 103508. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2024.103508>
- Quaassdorff, C. (2018). *Development of a microscale traffic emission simulation system. Application to madrid for the definition of air quality improvement measures / desarrollo de un sistema de simulación de emisiones del tráfico rodado a microescala. Aplicación a madrid para la definición de medidas de mejora de la calidad del aire*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=229184&info=resumen&idioma=SPA>
- Raju, N., & Farah, H. (2021). Evolution of Traffic Microsimulation and Its Use for Modeling Connected and Automated Vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2444363>
- Realpe, E., & Enríquez, D. (2018). *Desarrollar una metodología para la temporización de semáforos en la ciudad de Ibarra*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7841>
- Rocha, J., Zambrano, D., Portilla, Á., Erazo, G., Torres, G., & Llanes, E. (2018). Análisis de Gases del Motor de un Vehículo a través de Pruebas Estáticas y Dinámicas. *Revista Ciencia Unemi*, 11, 97–108. https://www.redalyc.org/journal/5826/582661251009/html/?utm_source=chatgpt.com
- Rodríguez, D., Guevara, M., Linares, M., Casanovas, J., Salmerón, J., Soret, A., Jorba, O., Tena, C., & Pérez, C. (2021). A coupled macroscopic traffic and pollutant emission modelling system for Barcelona. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102725>
- Rosero, F., Fonseca, N., Mera, Z., & López, J. (2023). Assessing on-road emissions from urban buses in different traffic congestion scenarios by integrating real-world driving, traffic, and emissions data. *Science of The Total Environment*, 863, 161002. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.161002>
- Ruiz, L., & Tineo, A. (2019). Una revisión de modelos de tráfico automotor usando autómatas celulares. *Revista Digital Novasinergría*, 2(2), 7–16. <https://doi.org/10.37135/UNACH.NS.001.04.01>
- Sanchez, A. (s/f). *Métodos de estimación de tránsito*. Recuperado el 7 de julio de 2024, de <https://es.slideshare.net/slideshow/mtodos-de-estimacin-de-trnsito/71833005#6>
- Sarango, P., & Díaz, B. (2020). Sistema web y móvil híbrido para la recolección muestral de datos sobre flujo vehicular en la zona de regeneración urbana de la ciudad de Loja, Ecuador. *ISSN*, 41.

- Sayed, S., Kumar, R., Ahmed, S., Kulkarni, K., Alam, T., & Eldin, S. (2023). Modelling of multiple biodiesel-emitted nitrogen oxides using ANN approach. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 116–125. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2023.08.005>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025/>
- Sisalima, F. (2018). *SISTEMA PARA DETECCIÓN Y CONTEO VEHICULAR APLICANDO TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL*.
- Smit, R. (2007). *An Examination of Congestion in Road Traffic Emission Models and Their Application to Urban Road Networks*. <https://doi.org/10.25904/1912/672>
- Soca, J. (2021). *EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*. <https://www.researchgate.net/publication/357753927>
- Sun, P., Yu, Q., & You, K. (2024). Intelligent traffic management strategy for traffic congestion in underground loop. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 143, 105509. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2023.105509>
- Tarapues, B. (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., & Bull, A. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales recursos naturales e infraestructura*.
- Vega, D. (2015). *Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular y gasolineras del Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012 [UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO]*. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4178/1/113616.pdf>
- Velepucha, J., & Sabando, L. (2021). Emisiones de gases contaminantes en vehículos livianos a gasolina. *Revista Científica "INGENIAR": Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 4. <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/34/49>
- Villarroel, L., & Vildoso, A. (2015). *Métodos de aforo vehicular*. https://prezi.com/6radno-5_7jf/metodos-de-aforo-vehicular/
- Viteri, R., Borge, R., Paredes, M., & Pérez, M. (2023). A high resolution vehicular emissions inventory for Ecuador using the IVE modelling system. *Chemosphere*, 315, 137634. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137634>
- Waldeer, K. (2003). The direct simulation Monte Carlo method applied to a Boltzmann-like vehicular traffic flow model. *Computer Physics Communications*, 156(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(03\)00368-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(03)00368-0)
- Wang, Z., Shen, L., Lei, J., Yao, G., & Wang, G. (2022). Impact characteristics of post injection on exhaust temperature and hydrocarbon emissions of a diesel engine. *Energy Reports*, 8, 4332–4343. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.03.080>
- Xu, J., Hilker, N., Turchet, M., Al-Rijleh, M., Tu, R., Wang, A., Fallahshorshani, M., Evans, G., & Hatzopoulou, M. (2018). Contrasting the direct use of data from traffic radars and video-cameras with traffic simulation in the estimation of road emissions and PM hotspot analysis.

Transportation Research Part D: Transport and Environment, 62, 90–101.
<https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.02.010>

Yan, Z., Zeng, J., Xiao, Y., Wang, Z., Li, Q., & Lu, X. (2024). Exploring carbon dioxide generation in combustion of long-flame coal in Huating mining area by using ReaxFF MD. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104171. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.104171>

Yolanda, M., Morales, R., & Guzmán, A. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE*.

Zhao, B., Lin, Y., Hao, H., & Yao, Z. (2022). Fuel Consumption and Traffic Emissions Evaluation of Mixed Traffic Flow with Connected Automated Vehicles at Multiple Traffic Scenarios. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 6345404. <https://doi.org/10.1155/2022/6345404>