



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIA APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“EFECTOS DEL TRÁFICO Y TIPO DE VEHÍCULO EN LA CALIDAD DEL
AIRE DE UNA VÍA URBANA EN IBARRA”**

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

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Stalyn Francisco Díaz Guamán

DIRECTOR:

Ing. Zamir Andrés Mera Rosero PhD.

Ibarra – Ecuador 2026



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:	1004379952		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Díaz Guamán Stalyn Francisco		
DIRECCIÓN:	Juana Atabalipa y Hernán Gonzales de Saa – Imbabura - Ibarra		
EMAIL:	sfdiazg@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0991231079

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Efectos del tráfico y tipo de vehículo en la calidad del aire de una vía urbana en Ibarra
AUTOR:	Stalyn Francisco Díaz Guamán
FECHA:	2026/01/23
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR:	PhD. Zamir Andrés Mera Rosero

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 23 días, del mes enero de 2026

EL AUTOR:

Firma:



Nombre: Stalyn Francisco Díaz Guamán

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 23 de enero de 2026

PhD. Zamir Andrés Mera Rosero

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.



Firmado electrónicamente por:
**ZAMIR ANDRES MERA
ROSERO**

Validar únicamente con FirmaEC

(f)
Ing. Zamir Andrés Mera Rosero Ph.D.
C.C.:1003184478

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Efectos del tráfico y tipo de vehículo en la calidad del aire de una vía urbana en Ibarra” elaborado por Stalyn Francisco Díaz Guamán, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Firmado electrónicamente por:
**ZAMIR ANDRES MERA
ROSERO**

Validar únicamente con FirmaEC

(f):.....

PhD. Zamir Mera
C.C.: 1003184478



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ANDRES GARZON
PEREZ**

Validar únicamente con FirmaEC

(f):.....

Ing. Andres Garzón Ph.D.
C.C.: 1002640454

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, a mi madre, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por tu apoyo incondicional, por creer en mi en cada etapa del camino y por ser el motor que impulso la culminación de este logro académico.

A mi abuelito Francisco, cuyo ejemplo de vida, valores y sabiduría han sido fuente constante de inspiración. Su guía y enseñanza permanecerán siempre presentes en cada meta que me proponga alcanzar.

A mi familia, por su comprensión, motivación y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Finalmente, a mis amigos, por su compañerismo, apoyo y motivación a lo largo de este proceso académico. Gracias por estar presente en los momentos de esfuerzo, dudas y satisfacción, haciendo este camino más llevadero.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por brindarme la fortaleza, constancia y sabiduría necesarias para culminar este trabajo de investigación.

De igual manera, agradezco profundamente a mi madre por su apoyo incondicional, paciencia y motivación permanente durante todo mi proceso de formación académica.

De manera especial, agradezco a mi tutor y asesor de tesis, quienes con su orientación, conocimientos y acompañamiento constante contribuyeron de forma fundamental al desarrollo del presente trabajo, aportando criterios técnicos y académicos que permitieron fortalecer la investigación.

Asimismo, extendo mi agradecimiento a todos los docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación universitaria compartieron sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, siendo parte esencial de mi crecimiento académico y profesional.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación analiza los efectos del tráfico y el tipo de vehículo sobre la calidad del aire en una vía urbana de la ciudad de Ibarra mediante el uso de conteo vehicular automatizado y sensores de bajo costo. La metodología incluye una campaña experimental para la recopilación de datos durante el mes de mayo de 2025, en la cual se implementó un sistema integrado de monitoreo compuesto por cámaras ANPR (reconocimiento automático de matrículas) para el conteo y clasificación del flujo vehicular, como también la integración de monitores destinados a la medición de material particulado, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, trabajando las 24h de forma continua. La zona de estudio corresponde a la intersección de las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo, un punto caracterizado por su alta carga vehicular. Durante el periodo de monitoreo se registró un flujo total de 309,211 vehículos, con un promedio semanal de 61,842 vehículos. El análisis conjunto de la información recolectada evidenció una relación directa entre el incremento del flujo vehicular y las concentraciones de $PM_{2.5}$, con picos notables en horas punta, especialmente alrededor de las 07:00h, cuando las emisiones alcanzaron un promedio diario de $15,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque los niveles registrados se mantuvieron dentro del límite permisible establecido por la normativa ecuatoriana ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$), en varios días se superaron las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud ($15\mu\text{g}/\text{m}^3$). Finalmente, la implementación de cámaras ANPR demostró un bajo porcentaje de error (0.73%) en el registro del flujo vehicular, lo que respalda la confiabilidad de los datos obtenidos y permite establecer con mayor precisión la relación entre el tráfico y los niveles de contaminación atmosférica.

Palabras clave: Calidad del aire, tráfico vehicular, emisiones vehiculares, vías urbanas, monitoreo ambiental, cámaras ANPR, sensores de bajo costo.

ABSTRACT

This research analyzes the effects of traffic and vehicle type on air quality in an urban road in the city of Ibarra through the use of automated vehicle counting and low-cost sensors. The applied methodology includes an experimental campaign for data collection during May 2025, in which an integrated monitoring system was implemented consisting of ANPR cameras for vehicle flow counting and classification, as well as the integration of monitors dedicated to measuring particulate matter, carbon dioxide, nitrogen oxides, and volatile organic compounds, operating continuously 24 hours a day. The study area corresponds to the intersection of Simón Bolívar and Miguel Oviedo streets, a point characterized by its high vehicular load. During the monitoring period, a total flow of 309,211 vehicles was recorded, with a weekly average of 61,842 vehicles. The joint analysis of the collected information evidenced a direct relationship between the increase in vehicular flow and PM_{2.5} concentrations, with notable peaks during rush hours, especially around 07:00h, when emissions reached a daily average of 15.70 µg/m³. Although the recorded levels remained within the permissible limit established by Ecuadorian regulations (50 µg/m³), on several days the World Health Organization recommendations (15 µg/m³) were exceeded. Finally, the implementation of ANPR cameras demonstrated a low error percentage (0.73%) in recording vehicular flow, which supports the reliability of the data obtained and allows for a more precise establishment of the relationship between traffic and atmospheric pollution levels.

Keywords: Air quality, vehicular traffic, vehicle emissions, urban roads, environmental monitoring, ANPR cameras, low-cost sensors

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	7
AGRADECIMIENTO.....	8
RESUMEN EJECUTIVO	9
ABSTRACT	10
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
INDICE DE ECUACIONES.....	18
CAPÍTULO I.....	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1 Planteamiento del Problema.....	19
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
1.3 Alcance.....	20
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Descripción de la ciudad de Ibarra.....	21
2.1.1 Desarrollo urbano y crecimiento del parque automotor.....	22
2.2 Contaminación atmosférica.....	22
2.2.1 Calidad de aire.....	22
2.2.2 Principales contaminantes atmosféricos.....	23
2.3 Fuentes contaminantes móviles.....	23
2.3.1 Gases emitidos por fuentes móviles.....	24
2.3.2 Dióxido de carbono.....	24
2.3.3 Monóxido de carbono	26
2.3.4 Hidrocarburos no quemados.....	26
2.3.5 Material particulado	27
2.4 Efectos de la contaminación del aire en la salud humana y el medio ambiente.....	28
2.5 Normas de emisiones vehiculares en Ecuador y a nivel internacional.....	29
2.5.1 Calidad de aire según la Organización Mundial de la Salud (OMS)	29
2.5.2 Calidad de aire en el Ecuador.....	31

2.5.3	Congestionamiento vehicular.....	35
2.5.4	Modelos de flujo de tráfico	36
2.6	Cámara ANPR.....	37
CAPÍTULO III		38
MATERIALES Y MÉTODOS		38
3.1	Selección de variables	39
3.1.1	Circulación continua y discontinua	40
3.1.2	Intensidad vehicular	40
3.1.3	Factor de hora punta.....	41
3.2	Selección de equipos	41
3.2.1	Monitor Open Air “O-1PST”	42
3.2.2	Cámara “DHI-ITC413-PW4D”	43
3.3	Definición de la zona de estudio	45
3.3.1	Caracterización de zona de estudio	46
3.4	Configuración de equipos y pruebas piloto.....	47
3.4.1	Configuración del equipo O-1PST monitor Air Gradient.....	47
3.4.2	Plataforma Airgradient del monitor O-1PST	47
3.4.3	Configuración de cámara “DHI-ITC413-PW4D”	48
3.4.4	Plataforma Dahua en línea	49
3.4.5	Pruebas piloto.....	50
3.5	Campaña experimental.....	51
3.5.1	Instalación de sensor Airgradient.....	51
3.5.2	Instalación de cámara ANPR	52
3.6	Procesamiento de datos los equipos	53
3.6.1	Extracción de datos de los equipos	53
3.6.2	Transformación de los datos de los equipos.....	55
3.6.3	Visualización de la información.....	56
CAPÍTULO IV		57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		57
4.1	Total de vehículos registrados.....	57
4.2	Segmentación de vehículos por placa	58
4.3	Distribución de vehículos por calle.....	60
4.4	Errores de conteo.....	61

4.5	Distribución horaria del tráfico vehicular	63
4.5.1	Flujo de tráfico en la calle Simón Bolívar.....	63
4.5.2	Flujo de tráfico en la calle Miguel Oviedo.....	67
4.6	Comparación entre las calles.....	71
4.6.1	Análisis por semanas entre las dos calles.....	72
4.7	Concentración promedio de contaminantes	74
4.7.1	Límites establecidos por normativas ambientales para concentraciones PM _{2.5} 74	
4.7.2	Promedio Material Particulado 2.5.....	74
4.7.3	Promedio de CO ₂	79
4.7.4	Promedio Material Particulado 10	80
4.7.5	Índices de NO _x	82
4.7.6	Índices de TVOC.....	84
4.8	Relación entre flujo vehicular y contaminación.....	86
4.8.1	Correlación de contaminación con el tráfico vehicular.....	86
CAPÍTULO V		91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		91
5.1	Conclusiones	91
5.2	Recomendaciones.....	93
ANEXOS.....		96
BIBLIOGRAFÍA.....		96

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Efectos en la salud humana por la exposición a contaminantes atmosféricos.....	29
Tabla 2 Concentración máximas permitidas de contaminantes según la OMS.....	30
Tabla 3 Contaminantes según sus niveles de criterio.....	32
Tabla 4 Especificaciones Técnicas Monitor “O-1PST”	43
Tabla 5 Especificaciones Técnicas Cámara Dahua DHI-ITC413-PW4D.....	44
Tabla 6 Caracterización de la zona de estudio	47
Tabla 7 Total de vehículos registrados por calle.....	57
Tabla 8 Comparación de número de vehículos por semanas	73

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Mapa de la división política del cantón Ibarra.....	21
Figura 2 Fuentes de emisión	23
Figura 3 Emisiones emitidas por los vehículos.....	24
Figura 4 Porcentaje de emisiones de CO ₂ anuales	25
Figura 5 Generación de hidrocarburos en la combustión del combustible.....	27
Figura 6 Comparación de tamaño de las partículas de PM.....	28
Figura 7 Escala colorimétrica del índice de calidad del aire para PM _{2,5} Estados Unidos	34
Figura 8 Flujograma de metodología	39
Figura 9 Monitor “O-1PST”	42
Figura 10 Cámara Dahua DHI-ITC413-PW4D	44
Figura 11 Zona de estudio, calle Simón Bolívar- Miguel Oviedo	46
Figura 12 Software en línea AirGradient	48
Figura 13 Interfaz web de la cámara	50
Figura 14 Imagen referencia de las cámaras con su sensor.....	51
Figura 15 Extracción de datos del sensor Air Gradient	55
Figura 16 Panel de visualización de datos del software Power BI.....	56

Figura 17	Total de vehículos registrados	58
Figura 18	Registros de segmentación de vehículos.....	59
Figura 19	Registros de segmentación de vehículos por tamaño	59
Figura 20	Distribución de vehículos por calle	61
Figura 21	Ejemplo de detección de vehículos “camión”	62
Figura 22	Ejemplo de detección de vehículos “camioneta”	63
Figura 23	Flujo de tráfico de calle Simón Bolívar por horas	65
Figura 24	Distribución diaria del flujo vehicular en la calle Simón Bolívar	67
Figura 25	Flujo de tráfico de calle Miguel Oviedo por horas	69
Figura 26	Flujo de tráfico de calle Miguel Oviedo por días	70
Figura 27	Comparación de tráfico vehicular entre calles.....	71
Figura 28	Porcentaje de número de vehículos por calle.....	74
Figura 29	Promedios por hora de material particulado 2.5.....	75
Figura 30	Promedios diarios de PM _{2.5}	78
Figura 31	Promedios por hora de CO ₂	79
Figura 32	Promedios diarios de CO ₂	80
Figura 33	Promedios por horas de PM ₁₀	81
Figura 34	Promedios diarios de PM ₁₀	82

Figura 35 Promedio de NO _x por fecha.....	83
Figura 36 Promedios por hora de NO _x	83
Figura 37 Promedio de TVOC por fecha	85
Figura 38 Promedio mensual de TVOC por hora	86
Figura 39 Coeficiente de correlación entre número de vehículos y promedio diario de CO ₂	87
Figura 40 Gráfico de dispersión entre número de vehículos y promedio diario de CO ₂	88
Figura 41 Coeficiente de relación entre número de vehículos y promedio diario de PM _{2.5}	89
Figura 42 Gráfico de dispersión entre número de vehículos y promedio diario de PM _{2.5}	90

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Fórmula de la intensidad vehicular	40
Ecuación 2 Fórmula del factor hora punta	41

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En los últimos años se ha desarrollado un crecimiento acelerado de las ciudades y junto a esto el aumento del parque automotriz, lo que a generando una mayor congestión vehicular en vías urbanas. Todos estos problemas han causado un gran impacto en factores sociales, económicos y ambientales, siendo así la contaminación uno de los problemas más grandes que tiene el mundo. El monitoreo de la calidad de aire en otros países es bastante común, en Latinoamérica son pocas ciudades las que cuentan con un sistema así para la evaluación de los niveles contaminantes en el aire.

Uno de los principales factores contaminantes en zonas urbanas es el tráfico vehicular, cuyas emisiones más comunes son dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos, y otros compuestos. Otros factores que intervienen es el tipo de vehículos ya que existen vehículos antiguos que utilizan combustibles fósiles y tienden a contaminar en mayor medida.

Por este motivo, surge la necesidad de evaluar y cuantificar el efecto del tráfico y tipo de vehículos en la calidad del aire de una vía urbana específica, con el fin de tomar decisiones sobre la gestión de vehículos en la ciudad de Ibarra.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar los efectos del tráfico y tipo de vehículo en la calidad del aire de una vía urbana en Ibarra mediante el conteo vehicular automatizado y sensores bajo costo de calidad del aire.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la zona en donde se realizarán las mediciones de calidad del aire.
- Seleccionar el equipo de monitoreo de calidad del aire.
- Realizar el conteo de vehículos en la vía urbana elegida.
- Realizar la campaña de medición de tráfico y calidad de aire.

1.3 Alcance

El siguiente proyecto pretende realizar una evaluación de la calidad del aire mediante una estación bajo costo en una zona de congestión de la ciudad de Ibarra, con el objetivo de relacionar la calidad del aire con el tráfico vehicular.

Para llevar a cabo este estudio, se requerirá de un sistema de monitoreo continuo durante un periodo de un mes, lo que permitirá tener datos estadísticos sobre la condición ambiental y de tráfico en la zona de estudio elegida. El monitor de calidad de aire registrara varios parámetros como material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} ($\mu g/m^3$), dióxido de carbono CO_2 (ppm), óxido de nitrógeno NO_x (ppb) y compuestos orgánicos volátiles COV (ppb).

También, mediante un sistema de cámaras ANPR se realizará el monitoreo del flujo vehicular continuo durante las 24 horas en un periodo de 31 días correspondientes al mes del estudio, contabilizando automáticamente los vehículos que transita por la zona. Además, se realizará una segmentación y clasificación de tipo de vehículos que circulan por el área, como vehículos livianos, vehículos públicos, vehículos comerciales entre otros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

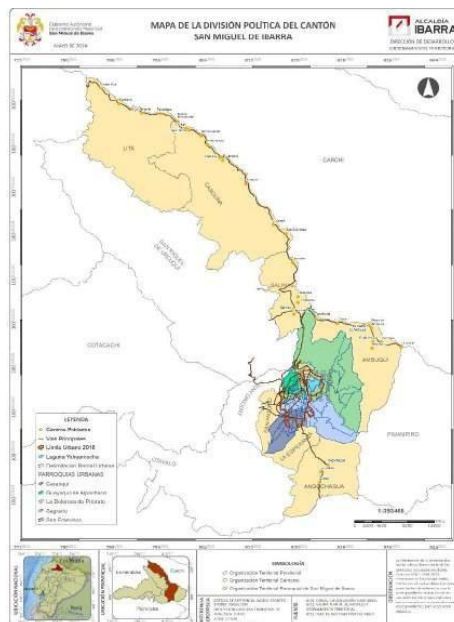
2.1 Descripción de la ciudad de Ibarra

Ibarra, capital de la provincia de Imbabura al norte de la sierra ecuatoriana, está situada a 115 km al noreste de la ciudad de Quito, y a 125 km de Colombia. Sus límites territoriales son al norte con la provincia del Carchi, sur con el cantón Antonio Ante, al este con el cantón Pimampiro y al oeste con provincias como Esmeraldas y Carchi [1].

En la **Figura 1** se presenta el mapa correspondiente, el cual permite ubicar el área de estudio y comprender sus límites geográficos.

Figura 1

Mapa de la división política del cantón Ibarra.



Tomado de: Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, PDOT, 2024 [1].

2.1.1 Desarrollo urbano y crecimiento del parque automotor

Según el plan de desarrollo de organización territorial de la ciudad de Ibarra, desde 1906 hasta 2017, la expansión de la ciudad se ha incrementado 43 veces [2], reflejando así un desarrollo urbano muy significativo. En los últimos años la ciudad ha aumentado su superficie 10 veces, mientras que la población solo ha crecido 4 veces en el mismo periodo. Si esta tendencia se mantiene, se proyecta que para el 2040 la ciudad multiplicará su tamaño [2]. Estos cambios han influido en el aumento del parque automotor y la dinámica del tráfico, según la Empresa Pública de Movilidad, Movildelnort se registran entre 1,500 a 2,000 vehículos solo en horas pico en el centro de Ibarra generando así nuevos desafíos en la planificación de la movilidad.

2.2 Contaminación atmosférica

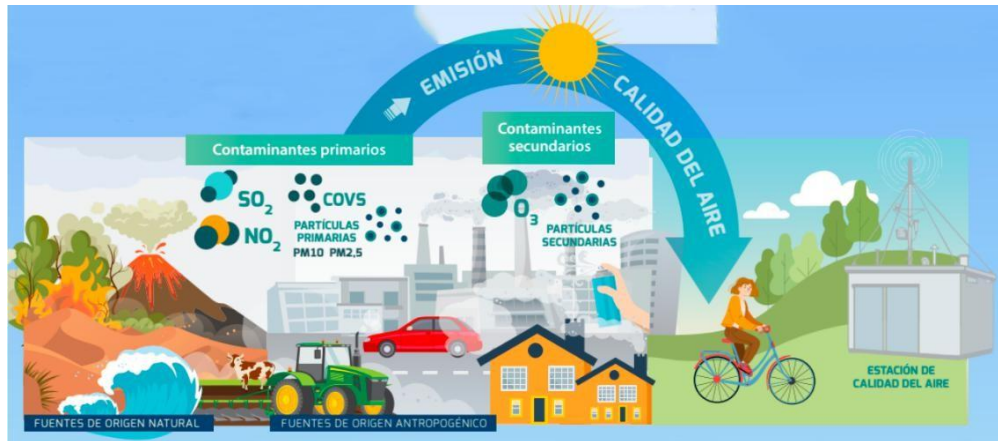
2.2.1 Calidad de aire

En el ámbito ambiental, la calidad de aire se denomina a la ausencia de contaminantes que pueden afectar con la salud humana y afectar al ecosistema. Según el ministerio para la transición Ecológica de España [3], se conoce como el aire tiene relación con sustancias contaminantes, las cuales pueden provenir de fuentes naturales o actividades humanas, estas emisiones pueden ser por su composición individual o por un proceso físico químico como la combustión de los vehículos, estos pueden generar impactos en la salud, alterar el equilibrio del ecosistema.

En la **Figura 2** muestra una representación de las principales fuentes de emisión de contaminantes en el ambiente, clasificadas según su origen.

Figura 2

Fuentes de emisión



Tomado de: Ministerio para transición Ecológica, Gobierno España, 2023 [3].

2.2.2 Principales contaminantes atmosféricos

La contaminación atmosférica se entiende como la presencia de sustancias en el aire que representan un riesgo para la salud humana y el equilibrio ambiental. Estas pueden tener origen natural, como las erupciones volcánicas, los incendios forestales o elementos del suelo, aunque su impacto en la salud suele ser limitado [4]. En contraste, las emisiones derivadas de actividades humanas principalmente la quema de combustibles fósiles, la industria, la minería y las fuentes móviles como los vehículos liberan gases y partículas tóxicas que deterioran la calidad del aire y generan efectos más significativos sobre la salud y el medio ambiente [5].

2.3 Fuentes contaminantes móviles

Las fuentes móviles son las principales causas de la contaminación del aire ya que emiten una alta cantidad de contaminantes regulados como $CO, NO_x, SO_2, PM_{2.5}$ [6]. Existe un gran grupo de vehículos automotores que emiten estas emisiones, como vehículos particulares, autobuses, camiones, motocicletas, máquina pesada, trenes, aviones, los cuales utilizan combustibles fósiles.

La **Figura 3** muestra las emisiones directas más relevantes generadas por los vehículos, entre ellas los gases de escape como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), la resuspensión de polvo de la vía (PM_{10}) provocada por el tránsito, la evaporación de hidrocarburos provenientes del sistema de combustible y la abrasión de componentes mecánicos como neumáticos, frenos y embrague; todas estas fuentes representan una contribución significativa a la contaminación atmosférica.

Figura 3

Emisiones emitidas por los vehículos



Tomado de: European Environment Agency, 2019 [7].

2.3.1 Gases emitidos por fuentes móviles

Los gases emitidos por los vehículos y que de la misma manera producen efectos negativos sobre la salud son:

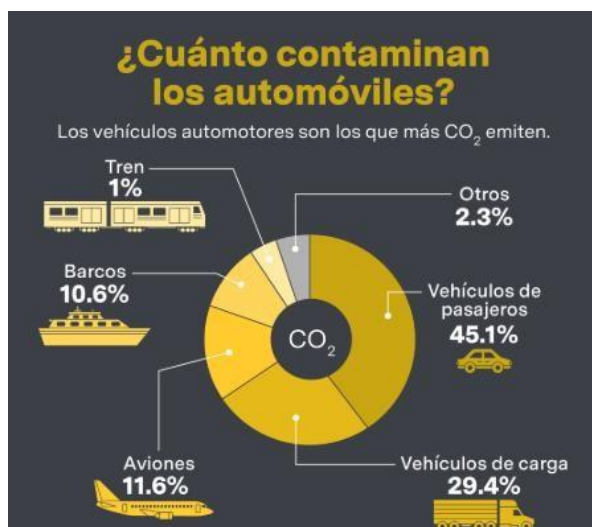
2.3.2 Dióxido de carbono

Representado mediante su fórmula química (CO_2), el dióxido de carbono es uno de los contaminantes principales que contribuyen al calentamiento global. En el sector transporte, los

vehículos automotores son los mayores emisores de CO₂, siendo los vehículos de pasajeros y de carga responsables de más del 70% de las emisiones anuales, como se muestra en la **Figura 4**. Este aumento de emisiones provoca el incremento de la temperatura del planeta, lo que a su vez genera consecuencias como el aumento del nivel del mar, la expansión de zonas desérticas y otras catástrofes ambientales. El impacto ambiental es resultado del producto de tres factores conocidos como “fuerzas motoras”: la población, la actividad económica y la tecnología [8]. El fenómeno del efecto invernadero representa la amenaza más significativa asociada al calentamiento global. Este proceso implica la retención de calor por parte de ciertos gases atmosféricos, principalmente vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y ozono (O₃). Es importante destacar que, en ausencia de este efecto natural, las condiciones en nuestro planeta serían drásticamente diferentes: las temperaturas caerían en promedio unos 30 grados, los océanos se solidificarían, y la existencia de vida tal como la conocemos sería prácticamente inviable.

Figura 4

Porcentaje de emisiones de CO₂ anuales



Tomado de: World Economic Forum/Statis, 2020, [8].

2.3.3 Monóxido de carbono

Se destaca como el contaminante atmosférico más significativo. Los vehículos son responsables de aproximadamente el 80% de sus emisiones, convirtiéndolos en la fuente principal de este compuesto. Investigaciones recientes han revelado que incluso niveles bajos de CO en el aire (menos de 25 partes por millón) y de carboxihemoglobina en sangre (por debajo del 10%) pueden tener efectos perjudiciales para la salud cardiovascular y neuropsicológica. Estos hallazgos subrayan la seriedad de la contaminación por CO, incluso en concentraciones que anteriormente se consideraban seguras [9].

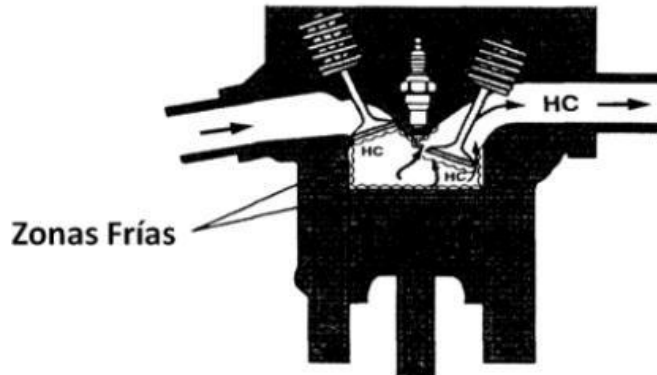
2.3.4 Hidrocarburos no quemados

Representado mediante su fórmula química (HC), el cual es medido a través de partes por millón (ppm), este se produce en la combustión al quemar el benceno el cual provoca síntomas irritativos en las mucosas [10]. En el medio ambiente reduce la capa de ozono el cual interviene en el enfriamiento de temperaturas, y un incremento de efecto calentamiento.

En los motores a gasolina, los hidrocarburos se producen por un fenómeno conocido como “enfriamiento de la pared”, que ocurre cuando la llama de combustión entra en contacto con zonas de menor temperatura dentro de la cámara, provocando su extinción antes de que el combustible se quemara por completo. Esto deja residuos de hidrocarburos que se liberan por el tubo de escape, como se ilustra en la **Figura 5**, donde se identifican las zonas frías responsables de la formación de estos contaminantes [11].

Figura 5

Generación de hidrocarburos en la combustión del combustible



Tomado de: e-auto, México, 2018 [11].

2.3.5 Material particulado

Las partículas PM_{10} , con diámetros entre 3 y 10 micras, son el resultado de la combustión incompleta del combustible y provienen de fuentes como cenizas, hollín, partículas metálicas y cemento. Estas partículas contribuyen significativamente al aumento del smog urbano, generando problemas respiratorios y visuales en la población[12].

Por otro lado, las $PM_{2.5}$, con diámetros menores a 2.5 micras, se originan por el alto índice de enfriamiento de los gases del escape, producto de la combustión interna del vehículo, y están asociadas a efectos adversos en la salud, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en niños y adultos mayores [12]. La **Figura 6** permite visualizar la escala de estas partículas en comparación con elementos cotidianos como el cabello humano y la arena de playa, lo que ayuda a dimensionar su capacidad de penetración en el sistema respiratorio.

Figura 6

Comparación de tamaño de las partículas de PM



Tomado de: Agencia de protección ambiental Estados Unidos (EPA),2024, [13].

2.4 Efectos de la contaminación del aire en la salud humana y el medio ambiente

El deterioro de la calidad del aire en las urbes de América Latina ha llegado a niveles alarmantes, siendo el aumento de vehículos en circulación el factor más influyente[14]. La implementación de un sistema riguroso de revisión y cuidado de los automóviles podría ser clave para reducir la emisión de gases nocivos. Algunas naciones han tomado medidas restrictivas en cuanto a la importación de vehículos, sean estos nuevos o de segunda mano. Es crucial fomentar una mentalidad ecológica, tanto entre los dueños de vehículos como en quienes tienen la responsabilidad de supervisar y regular estas cuestiones.

El 20% de la contaminación es causada por vehículos que emiten gases por la combustión de combustibles. Entre los contaminantes que perjudican están ya los antes mencionados monóxidos de carbono, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, hidrocarburos, ozono y partículas por millón [15].

En la **Tabla 1** se detalla las enfermedades que los contaminantes ya antes mencionados pueden provocar en la salud humana.

Tabla 1

Efectos en la salud humana por la exposición a contaminantes atmosféricos.

Contaminantes	Efectos en la salud humana
Dióxido de azufre (SO_2)	Irritación de las vías respiratorias. En altas concentraciones puede provocar bronquitis y traqueítis.
Monóxido de carbono (CO)	En altas concentraciones puede llegar a inhabilitar el transporte de oxígeno hacia las células. En exposiciones prolongadas provoca mareo, dolor de cabeza, inconsciencia e incluso la muerte.
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Irritación de las vías respiratorias y provocar bronquitis o neumonía cuando se presenta en altas concentraciones.
Ozono (O_3)	Irritación de vías respiratorias. En altas concentraciones puede llegar a reducir la función pulmonar, empeorar el asma, inflamar las células que recubren los pulmones y agravar enfermedades pulmonares crónicas.
Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	Pueden agravar el asma y enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La exposición crónica a altas concentraciones incrementa el riesgo de morbilidad y mortalidad.
Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)	Reducen la función pulmonar y se asocian con el desarrollo de diabetes. Pueden alterar la formación del feto en el embarazo.

Tomado de: Ceda Alonso, Análisis comparativo de las emisiones generadas por el transporte público y privado, 2019.

2.5 Normas de emisiones vehiculares en Ecuador y a nivel internacional

2.5.1 Calidad de aire según la Organización Mundial de la Salud (OMS)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) desempeña un papel crucial en la protección de la salud global. Entre sus responsabilidades, elabora directrices, normas y manuales que influyen directamente en el bienestar de la población mundial. Estas herramientas son adoptadas por entidades a nivel local, nacional y regional para gestionar la calidad ambiental y evaluar su impacto en la salud humana. Un ejemplo destacado de esta labor es la "Guía de la calidad del aire" [16],

documento que establece los niveles máximos aceptables de contaminación atmosférica. Según la OMS, estas directrices están fundamentadas en estudios científicos previos y determinan los umbrales por debajo de los cuales no se producen efectos adversos en la salud, o si existen, son mínimos. En la **Tabla 2** se indican dichos valores de referencia.

Los estudios sobre el material particulado (MP) en el aire revelan efectos negativos en la salud pública, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Estos impactos afectan principalmente a los sistemas respiratorio y cardiovascular, y se observan en los niveles de exposición actuales de las poblaciones urbanas [17].

La evidencia muestra que el riesgo de diversos problemas de salud aumenta con la exposición al MP. No se ha identificado un nivel seguro de exposición, ya que se han observado efectos adversos incluso a concentraciones cercanas a los niveles de fondo. Para partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), estos niveles de fondo se estiman entre 3-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Estados Unidos y Europa Occidental [18].

Las investigaciones epidemiológicas demuestran que el MP puede causar daños a la salud tanto en exposiciones cortas como prolongadas. Esto subraya la importancia de considerar los efectos del MP en la salud pública, incluso a niveles de concentración relativamente bajos [19].

Tabla 2

Concentración máximas permitidas de contaminantes según la OMS

Contaminante	Promedio Anual ($\mu\text{p}/\text{m}^3$)	Promedio Diario ($\mu\text{p}/\text{m}^3$)
NO_2	10	25
SO_2	-	40
PM_{10}	15	45
$PM_{2.5}$	5	15
CO	-	4

Tomado de: Organización Mundial de la Salud, 2021.

2.5.2 Calidad de aire en el Ecuador

El Ministerio del Ambiente identifica varios factores clave que contribuyen a la degradación de la calidad del aire:

- El crecimiento urbano desordenado.
- El uso de tecnologías industriales anticuadas.
- Un sistema de transporte ineficiente y combustibles de baja calidad.
- Actividades mineras a cielo abierto, entre otras causas.

El 7 de junio de 2011 se oficializó la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire mediante su publicación en el Registro Oficial. Esta norma no es un documento aislado, sino que forma parte integral del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Específicamente, se encuentra detallada en el Anexo 4 del Libro VI de dicho texto, según lo establecido por el Ministerio del Ambiente [20].

- Material particulado menor a 2.5 micrones ($PM_{2.5}$)

La normativa establece límites específicos para las concentraciones de $PM_{2.5}$ (partículas finas con diámetro de 2.5 micrómetros o menos) en el aire. En un período anual, el promedio de las mediciones no debe superar los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para mediciones en un lapso de 24 horas, el límite se fija en $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [21].

Según la norma de calidad del aire, se considera que se ha excedido el límite permitido si una estación de monitoreo registra valores iguales o superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en mediciones de 24 horas a lo largo de un año. Estas directrices fueron establecidas por el Ministerio del Ambiente en 2011 [22].

- Planes de alerta, alarma y emergencia de calidad de aire.

Según lo establecido por el Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador (MAAE) en 2003, es responsabilidad de la Entidad Ambiental de Control asegurar, a través de sus programas de monitoreo, que los niveles de contaminantes comunes en el aire ambiente a nivel del suelo no superen los límites establecidos [23].

La normativa define tres niveles de advertencia para la calidad del aire: alerta, alarma y emergencia. Estos niveles se determinan en base a las concentraciones de ciertos contaminantes considerados críticos [24]. La **Tabla 3**, proporciona detalles sobre las concentraciones específicas de estos contaminantes que corresponden a cada nivel de advertencia.

Tabla 3

Contaminantes según sus niveles de criterio

Contaminante y periodo de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de carbono concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15,000	30,000	40,000
Ozono concentración promedio en ocho horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	400	600
Dióxido de nitrógeno concentración promedio en una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,000	2,000	3,000
Dióxido de azufre concentración promedio en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	200	1,000	1,800
Material particulado PM ₁₀ concentración en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	250	400	500

Continúa Tabla 4. Contaminantes según sus niveles de criterio

Contaminante y periodo de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Material particulado PM _{2.5} concentración en veinticuatro horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	150	250	350

Nota: Elaboración propia con información tomada de [23], [24].

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es una herramienta que permite informar sobre los niveles de contaminación atmosférica en distintas áreas [25]. Mediante una red de monitoreo, se calcula diariamente este índice, clasificando cada contaminante [26]. A mayor valor del ICA, mayor es la contaminación y, consecuentemente, aumentan los riesgos para la salud [27].

El Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ) desarrolló el IQCA para proporcionar información accesible y precisa sobre la contaminación del aire. Este índice traduce datos técnicos de ingeniería ambiental a un formato más comprensible, convirtiendo las concentraciones de contaminantes (medidas en microgramos por metro cúbico) en escalas numéricas y de colores. Esto facilita la identificación de los contaminantes y sus efectos en la salud [28].

El IQCA utiliza una escala numérica de 0 a 500 como se observa en la **Figura 7**, complementada por un sistema de colores, para representar los distintos niveles de calidad del aire y sus implicaciones para la salud pública [29].

- Óptima: Color blanco (ICA de 0 a 50).
- Buena: Color verde (ICA de 50 a 100).
- No saludable para individuos extremadamente sensibles: Color gris (ICA de 100 a 200).

- No saludable para la mayoría de la población y peligrosa para individuos sensibles: Color naranja (ICA 300 a 400).
- Peligrosa para toda la población: Rojo (ICA 400 a 500).

Figura 7

Escala colorimétrica del índice de calidad del aire para PM_{2.5} Estados Unidos.

AQI	Nivel de contaminación del aire	Implicaciones para la salud	Declaración de precaución (para PM _{2.5})
0 - 50	Bueno	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación del aire presenta poco o ningún riesgo.	Ninguna
51 -100	Moderar	La calidad del aire es aceptable; sin embargo, para algunos contaminantes puede haber un problema de salud moderado para un número muy pequeño de personas que son inusualmente sensibles a la contaminación del aire.	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, como asma, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
101-150	Nocivo para grupos sensibles	Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos sobre la salud. No es probable que el público en general se vea afectado.	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, como asma, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
151-200	Insalubre	Todos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud; los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos de salud más graves	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, como asma, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre; todos los demás, especialmente los niños, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre
201-300	Muy insalubre	Advertencias sanitarias de situaciones de emergencia. Es más probable que toda la población se vea afectada.	Los niños y adultos activos, y las personas con enfermedades respiratorias, como asma, deben evitar todo esfuerzo al aire libre; todos los demás, especialmente los niños, deben limitar el esfuerzo al aire libre.
300+	Peligroso	Alerta de salud: todos pueden experimentar efectos de salud más graves	Todos deben evitar todo esfuerzo al aire libre

Tomado de: Air Quality Index, 2024, [30].

En la actualidad, las urbes globales se enfrentan a una serie de desafíos derivados del aumento constante del parque automotor. Esta proliferación de vehículos genera múltiples problemas, entre los que destacan:

- Atascos y congestiones viales
- Deterioro de la calidad del aire
- Contaminación acústica

- Mayor incidencia de accidentes de tráfico

Frente a esta situación, se ha vuelto crucial desarrollar modelos que representen con precisión los patrones de circulación vehicular. Estos modelos tienen como objetivo encontrar soluciones para optimizar el flujo del tráfico en las ciudades, buscando mitigar los efectos negativos mencionados y mejorar la movilidad urbana en general [31].

2.5.3 Congestionamiento vehicular

El congestionamiento vial se ha convertido en un desafío crítico para las grandes urbes, impulsado por el creciente número de personas y mercancías que requieren movilizarse diariamente. Este fenómeno no solo afecta a los usuarios individuales, sino que también impacta el transporte de productos comerciales, exacerbando la saturación de las vías urbanas. El aumento constante de vehículos en circulación no solo genera embotellamientos, sino que también provoca una cascada de problemas adicionales, incluyendo la contaminación ambiental, el exceso de ruido y un preocupante incremento en los accidentes de tránsito. La correlación entre el aumento del parque automotor y la mayor incidencia de siniestros viales es un tema que merece especial atención y análisis, dadas sus implicaciones en la seguridad y calidad de vida urbana [32].

En el ámbito de la ingeniería de tráfico, se han desarrollado diversos enfoques para analizar y resolver el problema del congestionamiento vehicular. Entre estos, destacan dos categorías principales: los modelos macroscópicos y los microscópicos. Los modelos macroscópicos se caracterizan por su enfoque general, donde no se consideran las particularidades individuales de los vehículos. En su lugar, estos modelos utilizan un acercamiento estadístico, promediando variables clave como el tamaño de los vehículos y la distancia entre ellos. Este método permite una visión amplia del flujo de tráfico, tratándolo como un fenómeno colectivo, sin entrar en los

detalles de cada vehículo individual [33]. Los modelos macroscópicos del tráfico vehicular incluyen un enfoque innovador que equipara el flujo de vehículos con el comportamiento de un fluido compresible. Esta perspectiva aplica principios de la teoría hidrodinámica para analizar y predecir los patrones de movimiento del tráfico. Al tratar el flujo vehicular como si fuera un líquido en movimiento, estos modelos pueden describir fenómenos como la formación de ondas de choque en el tráfico o la propagación de perturbaciones a lo largo de una vía congestionada, ofreciendo una visión única y potencialmente útil para la gestión del tráfico urbano.

Los modelos microscópicos de tráfico, incluyendo los basados en autómatas celulares, ofrecen un enfoque más detallado y preciso para analizar el flujo vehicular. Estos modelos consideran las características individuales de cada vehículo y establecen reglas específicas para su movimiento. Si bien proporcionan una representación más completa y realista de la dinámica del tránsito, también requieren una cantidad significativa de datos detallados. Esta información abarca aspectos como la infraestructura vial, los patrones de demanda de transporte y el seguimiento de las trayectorias individuales de los vehículos. Aunque obtener estos datos puede ser un desafío, las tecnologías avanzadas actuales están facilitando cada vez más su recopilación, permitiendo análisis más sofisticados y precisos del comportamiento del tráfico [34].

2.5.4 Modelos de flujo de tráfico

Los modelos de flujo de tráfico son representaciones matemáticas y conceptuales que describen cómo los vehículos se mueven e interactúan en las redes viales. Estos modelos son fundamentales para comprender y predecir el comportamiento del tráfico en diferentes condiciones, facilitando la planificación y gestión eficiente de los sistemas de transporte urbano [35]. Por lo general, los modelos de flujo de tráfico se basan en tres variables principales: velocidad, densidad y volumen.

La relación entre estas variables forma la base para la mayoría de los análisis y predicciones de tráfico. Existen varios tipos de modelos de flujo de tráfico, que van desde enfoques macroscópicos hasta microscópicos. Los modelos macroscópicos tratan el flujo de tráfico como un fluido continuo, utilizando ecuaciones diferenciales para describir el comportamiento agregado de los vehículos [36]. Por otro lado, los modelos microscópicos se centran en el movimiento individual de cada vehículo y sus interacciones, ofreciendo un nivel de detalle mayor, pero requiriendo más recursos computacionales. Entre estos extremos, los modelos mesoscópicos combinan características de ambos enfoques, proporcionando un equilibrio entre detalle y eficiencia computacional [37].

La aplicación de los modelos de flujo de tráfico se extiende a diversos aspectos de la ingeniería de transporte y la gestión urbana. Se utilizan para diseñar y optimizar sistemas de control de tráfico, evaluar el impacto de nuevas infraestructuras viales, desarrollar estrategias de gestión de la congestión y analizar la relación entre el flujo de tráfico y la calidad del aire urbano [38]. Con el avance de la tecnología, estos modelos se están volviendo cada vez más sofisticados, incorporando datos en tiempo real y técnicas de aprendizaje automático para mejorar su precisión y capacidad predictiva [39]. La integración de los modelos de flujo de tráfico con otras herramientas de planificación urbana está permitiendo un enfoque más holístico en la creación de ciudades más eficientes y sostenibles.

2.6 Cámara ANPR

Los primeros sistemas ANPR se iniciaron en los años 70 en Reino Unido gracias a “Police Scientific Development Branch”, su primordial objetivo era el detectar vehículos robados. Su evolución fue evidente tanto así que en el 2005 el sistema ANPR capturaba imágenes de placas

que circulaban a 160 km/h lo que facilitaba la posibilidad de encontrar vehículos robados verificando en una base de datos, siendo así uno de los sistemas más cotizados por compañías de seguros para brindar a sus clientes un mejor servicio [40].

El monitoreo del flujo vehicular se ha hecho muy popular debido al aumento de numero vehicular y sus diferentes aplicaciones. El monitorear una gran cantidad de vehículos necesita un sistema rápido la cual tenga respuestas agiles. Por la problemática ya mencionada se desarrolló el sistema automático de identificación y reconocimiento de placas para el monitoreo de vehículos en carretera.

Las cámaras con sistema ANPR (sistema de reconocimiento automático de matrículas) utilizan un reconocimiento óptico para la detección de caracteres en imágenes solidas de una manera automatizada, un tipo de sistema utilizado generalmente para el reconocimiento de placas de vehículos, conteo vehicular, entre otras cosas, mediante el uso de algoritmos, redes neuronales, operaciones morfológicas [41].

CAPÍTULO III

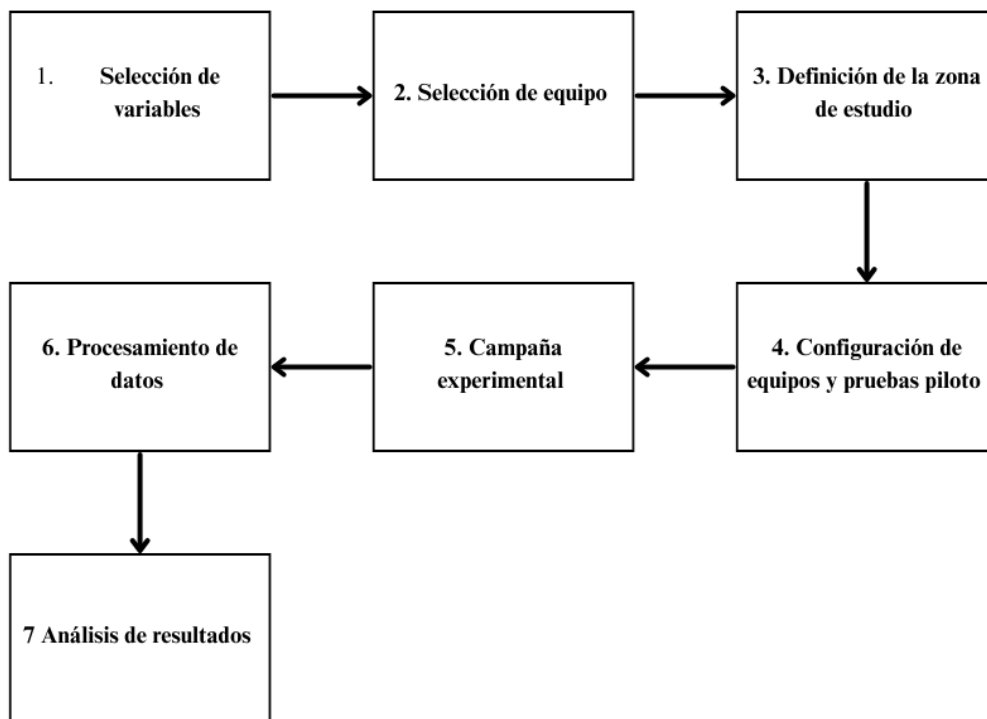
MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo presenta las diferentes fases que integran la metodología planteada para la realización de este estudio experimental. Cada una de las etapas se diseñaron para determinar los

efectos del tráfico y los tipos de vehículos que interfieren en la calidad del aire en una zona específica donde hay un flujo de vehicular alto, estimando factores de emisiones de $PM_{2.5}$ y CO_2 , además analizar la variabilidad que puede existir en diferentes horarios y días. Estas etapas se reflejan en el siguiente flujograma **Figura 8**.

Figura 8

Flujograma de metodología



estudio,
, resulta

esencial realizar un análisis previo de las distintas variables, las cuales se presentan a continuación como referencia fundamental para la construcción de la metodología experimental.

3.1.1 Circulación continua y discontinua

En una circulación continua no existen elementos de regulación fijos como por ejemplo semáforos los cuales obligan a que el vehículo se detenga. Las detenciones que pueden llegar a presentarse podrían ser por causas diferentes como accidentes, colisiones. averías, etc.

En una circulación discontinua existen elementos fijos que producen detenciones periódicas en la circulación vehicular como por ejemplo semáforos, stop, etc. Los elementos mencionados anteriormente obligan al vehículo a reducir parcialmente la velocidad o incluso parar en un momento.

3.1.2 Intensidad vehicular

La intensidad vehicular, calculada por la **Ecuación 1**, se refiere a la cantidad de vehículos que pueden llegar a circular por una determinada zona, esta se suele expresar en vehículos por hora o por día. Se utiliza generalmente para el control de tráfico, ordenación de la circulación, la demanda de una vía a y su vez el impacto en factores como la congestión, y también para medir la calidad del aire. La medición se la puede realizar mediante sensores, conteos manuales o sistemas automatizados de conteo vehicular.

Ecuación 1

Fórmula de la intensidad vehicular

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

Donde:

$n(x)$: número de vehículo que atraviesan la sección fija (x).

t : Intervalo temporal estudiado.

3.1.3 Factor de hora punta

El factor de hora punta, determinada mediante la **Ecuación 2**, tiene en cuenta las variaciones del tráfico a corto plazo, los cuales pueden llegar a ser un tráfico homogéneo o un tráfico no homogéneo. Un tráfico homogéneo se caracteriza por ser un flujo de vehículos constante donde la velocidad y la composición del tráfico mantiene una estabilidad relativa, por lo general esta es común en autopistas o vías en donde sigue patrones sin interrupciones bruscas. Por el contrario, el tráfico no homogéneo existe cuando no hay variaciones en la velocidad de un vehículo y el nivel de congestión, este tipo de tráfico es más común en zonas urbanas, donde las condiciones cambian debido a elementos como semáforos, stop, etc.

Ecuación 2

Fórmula del factor hora punta

$$FHP = \frac{Q}{4Q_{15MAX}}$$

Donde:

Q = Volumen de tráfico durante la hora.

Q_{15MAX} = volumen máximo registrado durante 15 minutos consecutivos de esa hora.

3.2 Selección de equipos

Para la continuación del trabajo fue fundamental investigar y seleccionar equipos adecuados que nos ayude en la medición de calidad del aire y un sistema automatizado para el conteo vehicular.

Los equipos seleccionados fueron monitor de calidad de aire exterior “Modelo O-1PST” de la compañía AirGradient Co. Ltd. Este tiene una aplicación para computador o celular llamado

Airgradient. Adicionalmente para el conteo vehicular se usó una cámara ANPR “DHI-ITC413-PW4D” de la compañía Dahua. Y finalmente para el procesamiento de datos en el software Power Bi.

3.2.1 Monitor Open Air “O-1PST”

Open Air “O-1PST”, mostrado en la **Figura 9**, es un monitor para exteriores que nos permite conocer la calidad de aire, es totalmente de código abierto, el cual recopila la información a través de sus tres sensores. El sensor uno se encarga de medir la materia particulada especialmente $PM_{2.5}$, la medición se la hace dentro del módulo PMS5003T para aumentar la precisión de PM, en donde también se realiza la medición de temperatura y humedad, el segundo sensor mide el CO_2 y por último el tercer sensor recolecta mediciones sobre el TVOC. Cabe destacar que este mismo equipo fue previamente empleado en la tesis de Cristian Oto, titulada Implementación de estaciones de calidad de aire de bajo costo para Ibarra [42], lo que evidencia su confiabilidad y precisión en estudios.

Figura 9

Monitor “O-1PST”



Tomado de: AirGradient,2025,[43].

Tiene una carcasa diseñada para obtener medidas precisas debido a que debe existir un buen flujo de aire hacia los sensores y al ser robusta y duradera está perfectamente diseñada para exteriores especialmente para protección de rayos UV, lluvia, polvo, etc. A continuación, en la **Tabla 5** se presentan más especificaciones del equipo.

Tabla 5

Especificaciones Técnicas Monitor “O-1PST”

Especificación	Descripción
Modelo	O-1PST (Gradiente de aire al aire libre).
Microcontrolador	ESP32-C3-MINI (procesador de un solo núcleo RISC-V de 32 bits, hasta 160 MHz, 384 KB de ROM, 400 KB de SRAM, 8 KB de SRAM en RTC, 4 MB de flash en paquete de chip).
Wi- Fi	2,4 GHz compatible con IEEE 802.11 b/g/n.
Bluetooth	Bluetooth LE: Bluetooth 5, Bluetooth en malla.
Extensiones Periféricos	Desglosado en PCB: I2C, 3 GPIO, 2 UART. LED de estado, botón pulsador, conector USB C.
Módulo sensor de partículas	Plantower PMS5003T (principio de dispersión láser). Precisión de PM2.5: $\pm 10\%$ a 100-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ a 0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (también se miden PM1 y PM10, pero PM2.5 presenta la mayor precisión).
Recinto	Plástico ASA, resistente a los rayos UV y a la intemperie.
Opciones de montaje	Opciones de montaje en pared o poste.
Cable	Cable USB (USB C a USB A) de 4 m que incluye líneas de datos para flasheo.

Continua **Tabla 6**. Especificaciones Técnicas Monitor “O-1PST”

Enchufe de alimentación	Se requiere un enchufe de alimentación USB A de 2A y 5V.
Certificaciones	CE, RoHS, REACH, FCC ID: 2AC7Z-ESPC3MINI.

Tomado de: AirGradient,2025,[43].

3.2.2 Cámara “DHI-ITC413-PW4D”

La DHI-ITC413-PW4D mostrado en la **Figura 10** es una cámara ANPR de la marca Dahua, esta tiene un sistema que ayuda a gestionar el tráfico, cuenta con un sensor CMOS de imagen para un alto rendimiento y un algoritmo de aprendizaje el cual permite reconocer los vehículos,

identificando así tipo de vehículo, marca, color, placa. Gracias a su estructura todo en uno facilita la instalación, incluye un puerto de señal, datos y comunicación para controlar el dispositivo. Es muy resistente al agua, polvo, daños físicos, además tiene una lente varifocal motorizada y consumo energético optimizado como lo dice en la **Tabla 7** de especificaciones técnicas.

Figura 10

Cámara Dahua DHI-ITC413-PW4D



Tomado de: Dahua Technology, 2025, [44].

Tabla 7

Especificaciones Técnicas Cámara Dahua DHI-ITC413-PW4D

Especificación	Descripción
Sensor de imagen	CMOS de 1/1,8”.
Resolución de la imagen	2688 × 1520.
Longitud focal	2,7 mm–12 mm.
Tipo de lente	Varifocal motorizado.
Fuente de alimentación	12 VCC, 2 A y POE: 802.3at, Tipo 2, Clase 4, (44 V a 57 V), 0,455 A a 0,351 A, máx. 20 W.
Consumo de energía	Consumo de energía en diferentes condiciones: Sin iluminación < 6 W. Iluminación < 12 W. Altavoz y advertencia de luz roja/azul encendida < 17 W.

Especificación	Descripción
Protección	IK10; IP67.
Material	Cuerpo de aleación de aluminio + plástico.
Dimensiones del producto	395,0 mm × 120,8 mm × 127,8 mm (15,55" × 4,76" × 5,03") (largo × ancho × alto).
Peso	2,3 kg (5,07 libras).
Certificaciones	CE-EMC; CE-LVD; CE-RED; FCC.

Tomado de: Dahua Technology, 2025, [44].

3.3 Definición de la zona de estudio

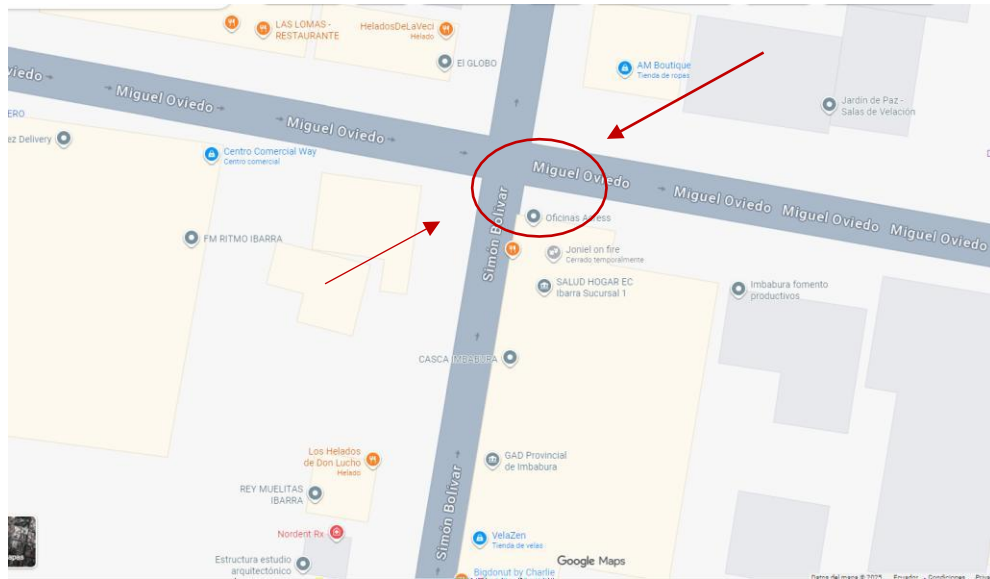
La zona de estudio se ubica en un sector de la ciudad de Ibarra con alta circulación vehicular. Permitiendo así obtener datos representativos sobre la calidad del aire y relacionándolos con los flujos de transporte y movilidad. Para garantizar un monitoreo eficaz, se requiere la conexión de internet y el acceso de una fuente de energía que permita el funcionamiento continuo de los sensores, y cámaras instaladas.

Luego de un análisis sobre la factibilidad del proyecto en diferentes locaciones de la ciudad, se decidió establecer como punto de investigación las calles Simón Bolívar y Oviedo específicamente en la esquina de la Prefectura de Imbabura como se observa en la **Figura 11**. La elección de esta

ubicación se fundamentó en su importancia como un espacio central de la ciudad de Ibarra, que concentra un alto flujo vehicular y cumple con las condiciones requeridas para este estudio.

Figura 11

Zona de estudio, calle Simón Bolívar- Miguel Oviedo



3.3.1 Caracterización de zona de estudio

El sector correspondiente a la calle Simón Bolívar está compuesto por dos vías destinadas a la captación del tráfico. Según las normativas de edificación y urbanismo vigentes en Ibarra, estas vías desempeñan un papel crucial en la distribución vehicular dentro del área urbana. Así mismo, facilitan el acceso a diferentes sitios, como parques, instituciones educativas, recreativos y comerciales de menor escala. Dichas vías están diseñadas para velocidades de circulación que oscilan entre los 20 y 40 km/h y cuentan con dos carriles unidireccionales, cada uno con un ancho de 3.50 metros.

Por otro lado, las vías arteriales se caracterizan por ofrecer una mayor fluidez y eficiencia en la movilidad. Estas permiten un flujo vehicular optimizado gracias a velocidades autorizadas similares, que van de los 20 a los 40 km/h, pero con carriles más amplios de 3.65 metros de ancho. A continuación, en la siguiente **Tabla 8** se muestra la característica de la vía escogida.

Tabla 8

Caracterización de la zona de estudio

Caracterización de la vía	
Composición del parque vehicular	Vehículos livianos motocicletas y buses escolares
Características de construcción de la vía	Dos carriles con presencia de un semáforo y la vía está construida en adoquín
Velocidad del tránsito vehicular	30 km/h
Ubicación dentro de la ciudad	Hiper centro

3.4 Configuración de equipos y pruebas piloto

3.4.1 Configuración del equipo O-1PST monitor Air Gradient

Para iniciar la configuración del monitor se debe conectar a una fuente de alimentación estable, una vez realizado el proceso antes mencionado es importante buscar el punto de acceso WiFi llamado “airgradient (número de serie del monitor)” accediendo a la interfaz a través de un ordenador o dispositivo móvil, después se ingresa a la pantalla del administrador de WiFi para proceder a buscar la red a la que se conectara ingresando su contraseña. Una vez que el monitor tenga una conexión a internet, su led parpadeara 3 veces lentamente. Algo muy importante es saber que tiene 180 segundos para completar el proceso.

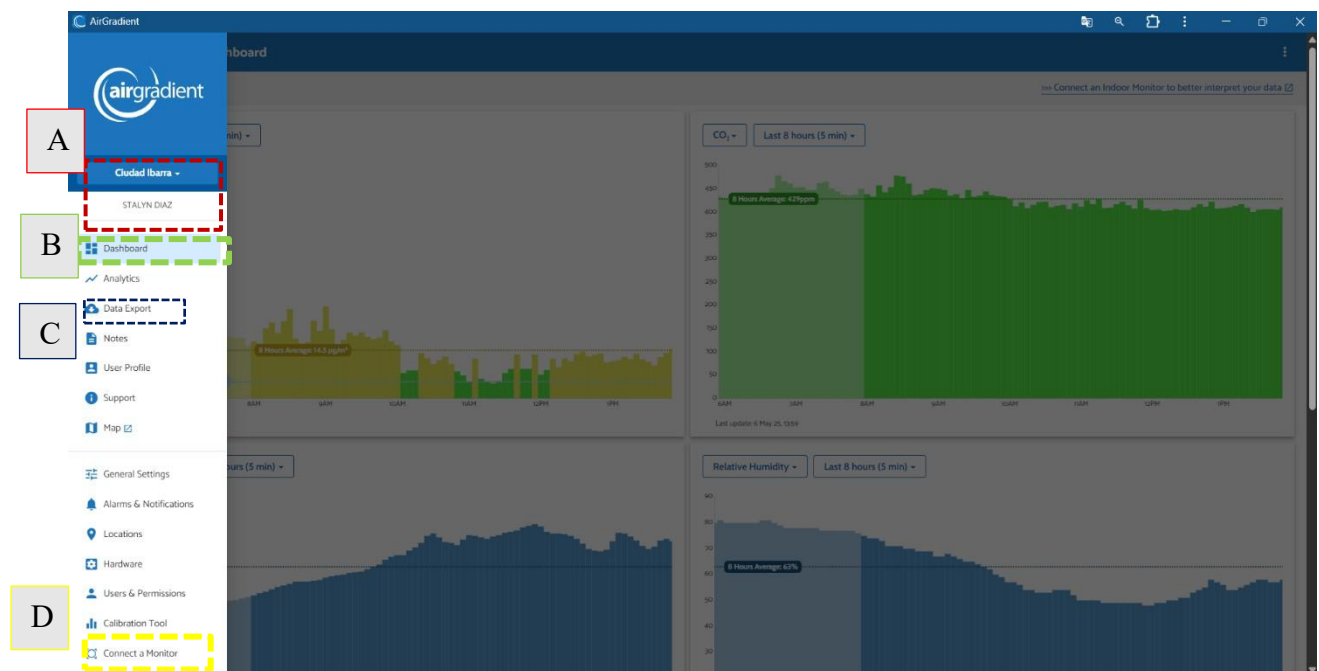
3.4.2 Plataforma Airgradient del monitor O-1PST

Los datos recopilados por el monitor se envían a un panel de control en la nube, enviando en tiempo real información actualizada. En la **Figura 12** se puede observar el panel de la plataforma,

mostrando el paso a paso para el monitoreo y obtención de resultados del monitor conectado, en la sección A, se necesita un usuario para poder acceder al panel de control, en la parte B se encuentra la información general en donde se puede observar datos como $PM_{2.5}$, CO_2 , Temperatura, Humedad y todos los datos y ubicaciones. En la sección C podemos encontrar la exportación de datos en donde podemos seleccionar la ubicación del monitor como también el día de inicio y el día final que podemos descargar. Y por último la sección D donde podemos conectar un monitor siguiendo los pasos ya antes mencionados.

Figura 12

Software en línea AirGradient



3.4.3 Configuración de cámara “DHI-ITC413-PW4D”

Para su configuración, es fundamental que las cámaras estén conectadas a una red estable con acceso a alimentación eléctrica. Una vez garantizada la conectividad, se accede a la interfaz de administración ingresando la dirección IP asignada por la Prefectura de Imbabura.

Desde un computador, se inicia sesión en el sistema utilizando las credenciales de usuario y contraseña correspondientes. Luego, se procede a la configuración de los parámetros de captura de placas de vehículos, ajustando la línea de activación y la sensibilidad de detección, asegurando una identificación precisa de los vehículos.

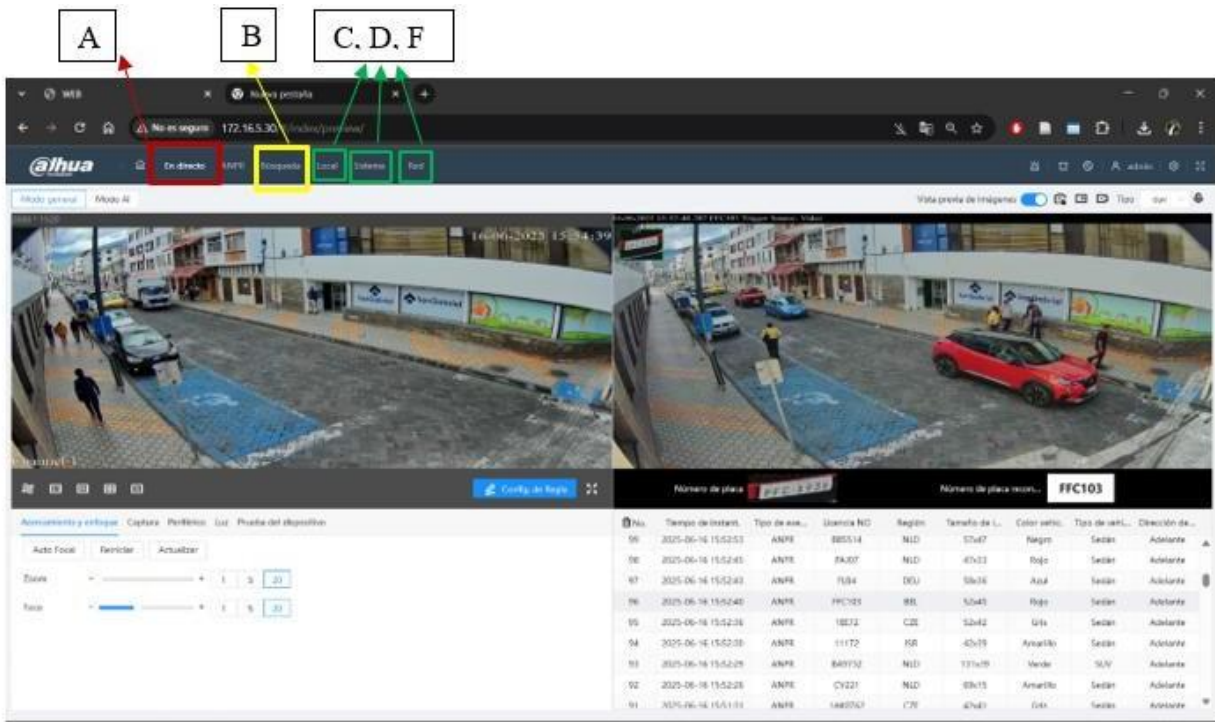
Finalmente, se configura el almacenamiento local, y se optimiza la integración con servidores, permitiendo la gestión eficiente de los datos capturados y facilitando el acceso remoto a la información registrada.

3.4.4 Plataforma Dahua en línea

Los datos obtenidos por la cámara ANPR se almacenan en una interfaz web, la cual se ingresa mediante una dirección IP local. En la **Figura 13** se puede observar el panel cámara, mostrando paso a paso lo que contiene esta interfaz, en la sección A se puede observar la transmisión en vivo, la cual se divide en dos partes, una indicando la sección general del entorno en donde se puede configurar varios parámetros importantes y la otra enfocada en cada vehículo que es captado al momento, junto a esto diferentes secciones como tiempo al instante, tipo de placa, región de marca del vehículo, tipo de vehículo, color del vehículo entre otros. En la sección B se encuentra la búsqueda por vehículo como se muestra en la figura en donde se divide por 4 secciones, siendo así la más importante la sección consulta de imagen en donde aquí se realiza la descarga de todos los datos de vehículos. En la sección C, D, F, son básicamente sección para la configuración de la cámara.

Figura 13

Interfaz web de la cámara



3.4.5 Pruebas piloto

Durante las semanas de abril, se llevaron a cabo pruebas piloto con el objetivo de evaluar el correcto funcionamiento de los equipos. En este período, se recolectaron datos provenientes del sensor de calidad del aire, así como el aforo vehicular mediante la cámara ANPR. Estas pruebas permitieron verificar la eficiencia de los dispositivos en términos de alimentación eléctrica y conectividad Wi-Fi, asegurando su óptimo desempeño en el monitoreo de las condiciones ambientales y del tráfico.

En la **Figura 14** adjunta, se presenta un croquis detallado de la zona de estudio, donde se señala la ubicación específica de los equipos utilizados en el análisis, al igual de cómo se instaló cada uno de los equipos.

Figura 14

Imagen referencia de las cámaras con su sensor



3.5 Campaña experimental

La ubicación de las cámaras con su sensor se la realizo lunes 14, martes 15 y miércoles 16, del mes de abril. Según la guía para la ubicación e instalación de sensores de aire de la EPA, considera 3 aspectos importantes, ya que la ubicación puede afectar mucho en los resultados.

Al igual con la cámara en donde se tiene que ubicar en un punto estratégico de las dos intersecciones para poder tener rango de visión a toda la calle.

3.5.1 Instalación de sensor Airgradient

- **Ubicación:** Según la guía de la EPA los sensores deben estar colocados a una altura de 2 a 5 m, ubicarse lejos de fuentes de contaminación por ejemplo fogatas o parrilladas, barreras

de árboles o arbustos, también en su ubicación es muy importante que se permita una circulación libre de aire hacia el sensor.

Al estudiar los puntos estratégicos para la ubicación del sensor se consideró varios objetivos importantes como el que este cerca del semáforo ya que puede existir una mayor afluencia vehicular en ese lugar, el lugar escogido luego de estudiar todos los puntos estratégicos fue en la calle Simón Bolívar justo en la esquina de la prefectura entre la intersección de la Simón Bolívar y Miguel Oviedo

- **Alimentación:** El sensor al necesitar una conexión de red, al igual que una red eléctrica de alimentación por lo que se realizó un informe con un permiso para que estos recursos los podamos tomar de la prefectura de Imbabura ya que se instaló en las afueras del edificio, instalándolo así en su punto estratégico para que los dos señales tanto eléctrica como conexión de red lleguen al sensor.
- **Seguridad:** el sensor se lo coloco junto a la cámara de tráfico vehicular con dos tiras en sus soportes correspondientes y a una altura considerable de 4 m para garantizar su seguridad.

3.5.2 Instalación de cámara ANPR

Para la instalación de las cámaras se consideraron diversos factores relevantes para su ubicación. Una de ellas se orientó hacia la calle Simón Bolívar y la otra hacia la calle Miguel Oviedo, ambas colocadas a una altura de 4 metros y alimentadas directamente desde el edificio. Una vez instaladas, se procedió a su configuración, siendo fundamental el proceso de calibración para garantizar la correcta captura de imágenes de cada vehículo.

3.6 Procesamiento de datos los equipos

El procesamiento de datos es donde la información de datos crudos se transforma en información significativa a través de varios procesos. Un proceso de extracción, transformación y carga, uno de los procesos conocidos como ETL (Extraction, Transformation and Load) este tiene la función de la extracción, limpieza, transformación y resumir los datos que se almacenan en un formato bruto. Como parte de una extracción se trata el seleccionar los datos en crudo lo que significa el cargar en una memoria. Durante una fase de transformación los datos cargados en la memoria se la realiza una limpieza personalizada y el generar una estructura resumida de acuerdo con las necesidades. En la fase de carga se realiza una inserción a todos los datos resumidos para tener informes detallados lo que proporciona una visión clara y una mejor obtención de datos[45].

El procesamiento de datos obtenidos por los equipos se desarrolla en tres fases las cuales son: extracción, transformación y carga. En la fase de extracción se realizó una recopilación de todos los datos en bruto generados por la cámara, los cuales puede incluir una base de datos como el número de placa, color de placa, tipo de vehículo, color del vehículo, entre otras. En la segunda fase se realiza una limpieza de todos los datos extraídos, corrigiendo así errores, validando la información de datos para asegurar una mejor precisión, y enriqueciendo la base de datos mediante la combinación de datos. Finalmente, se cargan y se transforman los datos en un sistema de almacenamiento, lo que permite una consolidación de información y con ello tener un mejor análisis de datos.

3.6.1 Extracción de datos de los equipos

3.6.1.1 Cámara “DHI-ITC413-PW4D”

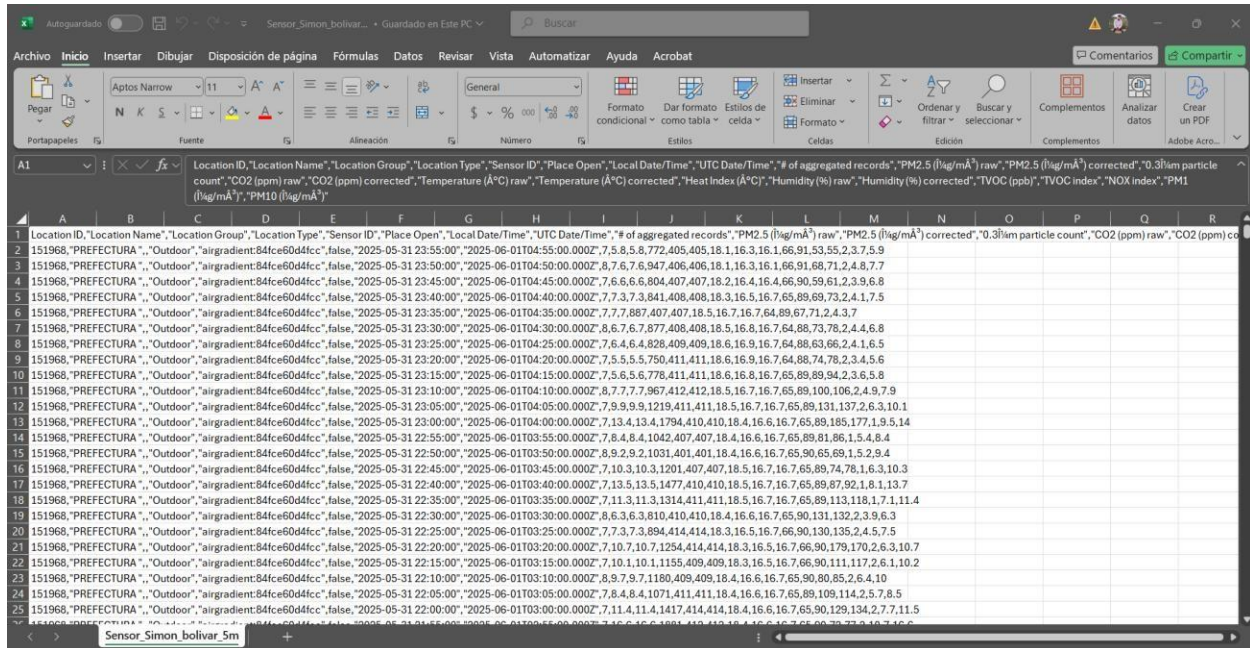
Durante la extracción de datos, se obtuvo informes en formato de texto “.txt”, con el fin de reducir el tamaño de la información almacenada para luego ser procesada en el software de datos Power BI, este procedimiento se la realizo de manera semanal permitiendo así una organización cronológica de los registros obtenidos. Además, se pudo ordenar los datos según la cámara de origen, diferenciando así la información obtenida por las dos cámaras instaladas en la zona de estudio: una ubicada en la calle Miguel Oviedo mientras que la otra en la calle Simón Bolívar. Esta separación ayudo a mejorar el análisis individual de cada punto, facilitando una mejor comprensión de datos.

3.6.1.2 Monitor open Air “O-IPST”

En la extracción de datos del monitor de calidad de aire se obtuvo informes en formato “CSV” como se observa en la **Figura 15**, en el cual al ser un archivo de texto que utiliza comas como delimitador para separar columnas tiene un peso menor para grandes cantidades de información. Gracias a la interfaz del panel del monitor nos ayuda a realizar la descarga de datos en varios formatos para ser procesada en el software de Power BI.

Figura 15

Extracción de datos del sensor Air Gradient



3.6.2 Transformación de los datos de los equipos

En este proceso se realizó la consolidación de todos los datos recopilados, con el objetivo de tener una única base de datos, posteriormente se realizó un proceso de limpieza y estructuración de los datos extraídos desde los archivos de texto obtenidos por la cámara de tráfico vehicular, en donde primeramente se van descartando los datos que no vamos a utilizar, varias variables que en si se repiten o algunos que no tienen mucha importancia.

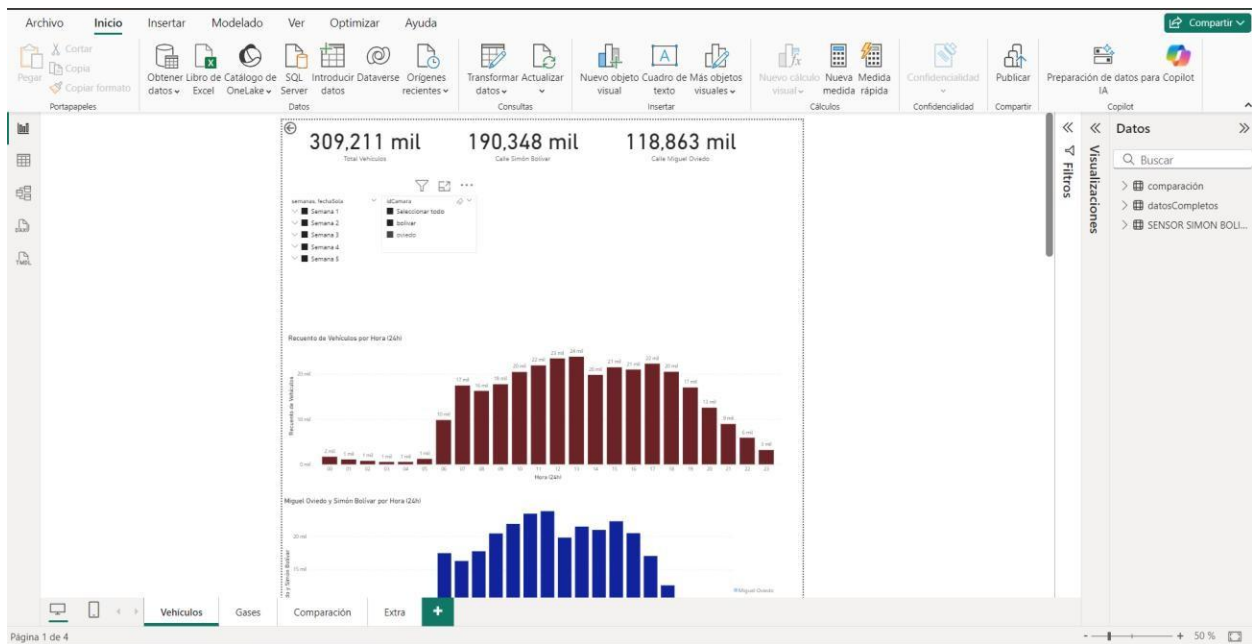
También a esto se le añadió columnas extras con el objetivo de dar un formato correcto, donde se pueda separar la información de la hora y la fecha. Esta estructura nos ayudó a organizar la información con mayor precisión ayudando así a un análisis más completo. Al unir estos elementos se facilitó la capacidad comparación.

3.6.3 Visualización de la información

La **Figura 16** muestra la integración de datos transformados de los sensores de calidad de aire como también los de tráfico vehicular proporcionados por la cámara al entorno de análisis, en este caso Power BI, con el objetivo de facilitar su exploración, visualización y generación de indicadores, posibilitando el análisis de comportamiento vehicular, la detección de eventos relevantes y la correlación de la información.

Figura 16

Panel de visualización de datos del software Power BI



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo se analiza los resultados obtenidos durante todo el mes de pruebas, referente al flujo vehicular y monitoreo de calidad de aire, los datos obtenidos se los proceso mediante un proceso llamado ETL (extracción, transformación y carga).

4.1 Total de vehículos registrados

En la **Tabla 9** se presenta el total de vehículos registrados durante el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de mayo. El monitoreo se llevó a cabo de manera continua, tanto en horario diurno como nocturno, lo que permitió obtener un conteo preciso y detallado del flujo vehicular a lo largo de todos los días del mes. Al igual que en la **Figura 17** se muestra el número de vehículos que transitaron por las calles antes mencionadas por cada fecha del mes. Todos los resultados se obtuvieron mediante cámaras instaladas en la esquina de la calle de intersección, lo que permitió el conteo vehicular diario.

- Mayor contaminación en CO₂, NO_x, PM_{2.5}.
- Deterioro de la calidad del aire y aumento de enfermedades.
- Provoca congestamiento vehicular.

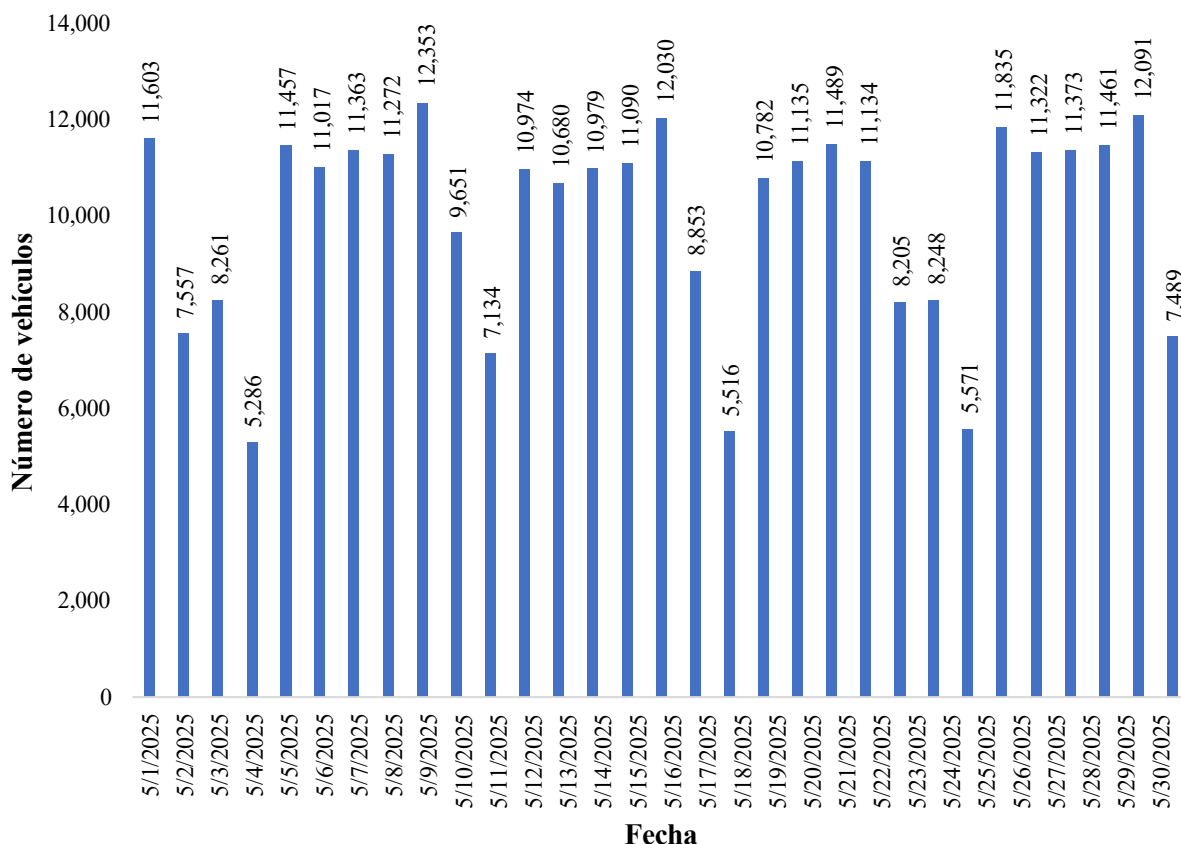
Tabla 9

Total de vehículos registrados por calle

Nombre de calle	Número de vehículos
Calle Simón Bolívar	190,348
Calle Miguel Oviedo	118,863
Total	309,211

Figura 17

Total de vehículos registrados



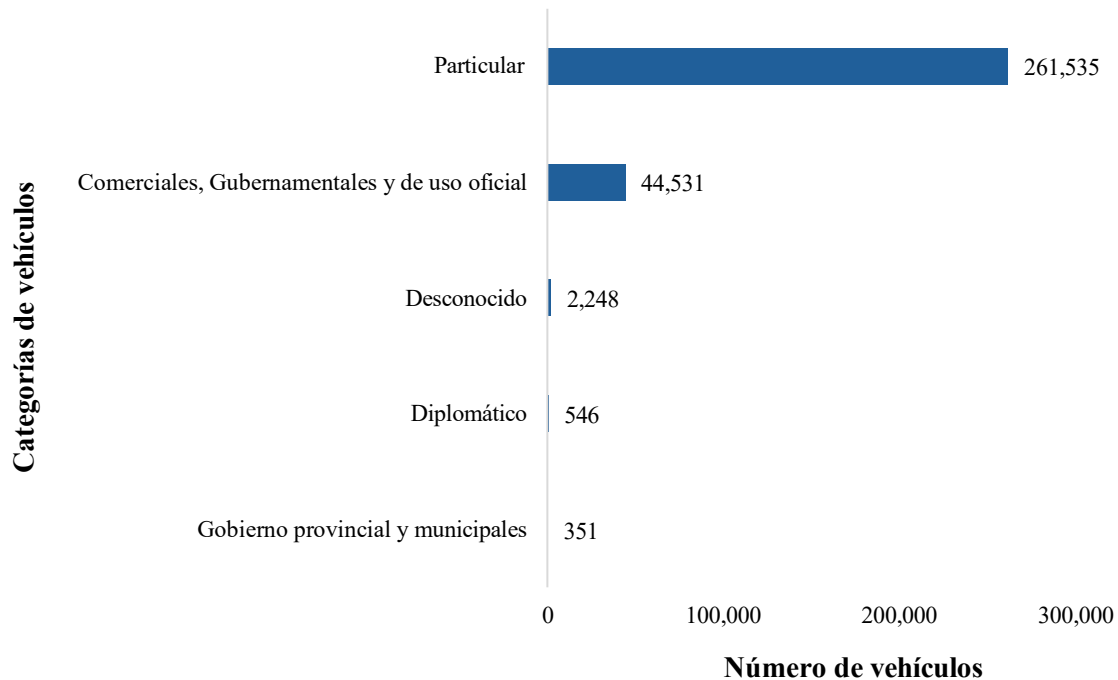
4.2 Segmentación de vehículos por placa

En la **Figura 18** se muestra el tipo de vehículos porcentual que transitan por la intersección entre la calle Simón Bolívar y la calle Miguel Oviedo. Esta clasificación se obtuvo a partir de los datos entregados por la cámara la cual tiene un reconocimiento de color de placas. Del total de vehículos registrados, se contabilizó 261,535 mil unidades correspondientes a vehículos particulares, lo que representa el 84% del total. Este grupo incluye varios tipos como sedan, SUV, camioneta, hatchback, motocicletas entre otras, mientras que el 14% está compuesto de vehículos comerciales entre los que se incluyen taxis, busetas escolares y transporte de servicio público. El porcentaje

restante se dividen en vehículos diplomáticos que pertenecen en vehículos del gobierno provincial y municipales.

Figura 18

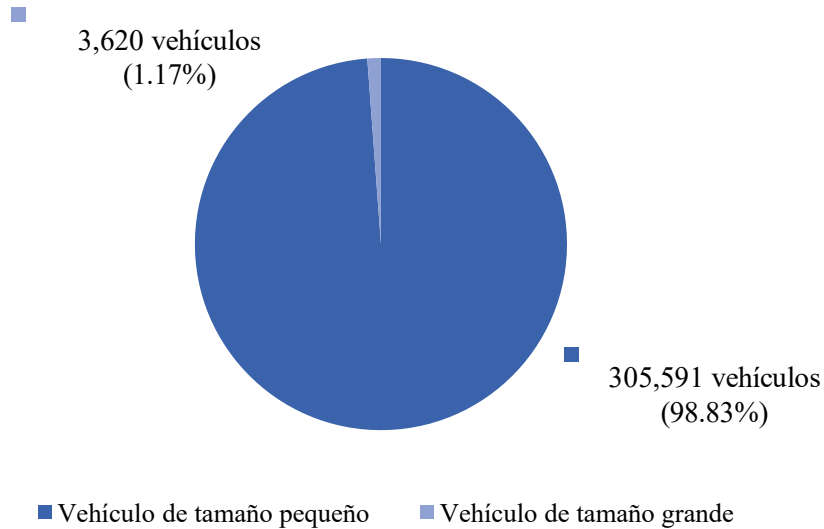
Registros de segmentación de vehículos



En la **Figura 19** se presenta la clasificación del tamaño de vehículos que transitan por la intersección ya antes mencionados. Esta categorización se la realizo gracias a la función de detectar el tamaño de vehículo. Los datos indican que el 98% corresponde a vehículos pequeños lo que se relaciona con la mayoría de fluencia vehicular que pasan por esa zona es de vehículos particulares.

Figura 19

Registros de segmentación de vehículos por tamaño



Mientras que solo el 1.17 % corresponde a vehículos grandes, este porcentaje se debe a que esta intersección se encuentra en el centro histórico de Ibarra, una zona que se caracteriza por tener calles estrechas y la prohibición de paso de rutas de transporte público como buses urbanos.

- Contaminación
- Congestión vehicular
- Deterioro de calles
- Contaminación acústica

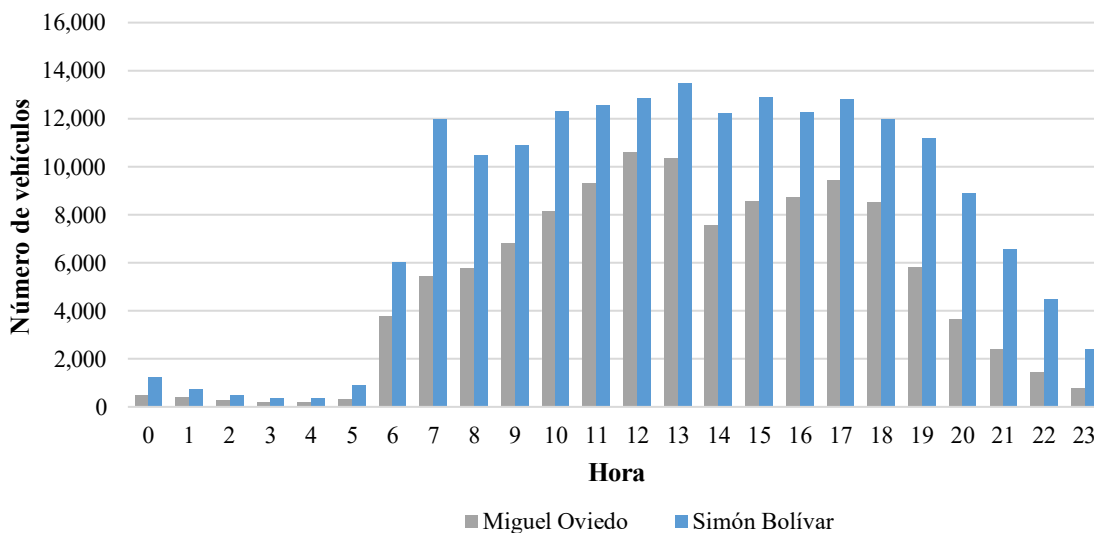
4.3 Distribución de vehículos por calle

La **Figura 20** nos indica la distribución de número de vehículos registrados por hora, mediante un gráfico de barras que registra el número de vehículos registrados por hora durante un día completo. Se evidencia una marcada variación horaria en el flujo vehicular, con incrementos significativos entre las 07:00h y las 18:00h, alcanzando picos más altos alrededor del mediodía. Este comportamiento refleja las dinámicas asociadas a actividades laborales, educativas y comerciales.

En cuanto al volumen total de vehículos, los datos indican que por la calle Simón Bolívar circulan aproximadamente 190,348 vehículos, mientras que por la calle Miguel Oviedo se registraron 118,863 vehículos. Tal como se detalla en la **Tabla 9**, los que indica que existe más afluencia vehicular por la calle Simón Bolívar, lo que puede atribuir que es una calle principal y su conexión directa a zonas de alta actividad, como parques, centros educativos, locales comerciales incluso centros gubernamentales y municipales.

Figura 20

Distribución de vehículos por calle



Este patrón de movilidad tiene implicaciones relevantes para la gestión urbana, entre ellas:

- Congestionamientos en horas pico.
- Contaminación atmosférica.

4.4 Errores de conteo

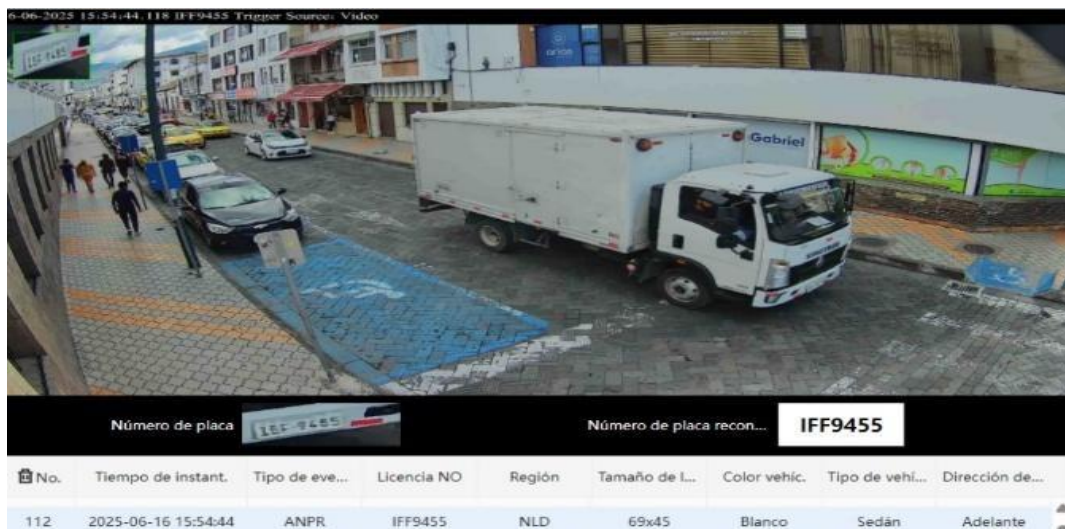
En el recuento de vehículos por su tipo de placa, mostrada en la **Figura 18**, se presentó un porcentaje de error del 0.73% equivalente a 2,248 vehículos clasificados como desconocidos del

total procesado. Este porcentaje de error puede atribuirse a las altas velocidades de circulación de los vehículos en la zona de estudio, lo cual dificulta la captura y el procesamiento adecuado de las placas por parte del sistema de reconocimiento de la cámara.

Otro error identificado en la cámara corresponde a la clasificación del tipo de vehículo, como se observa en la **Figura 21**. Al registrar el paso de un vehículo de gran tamaño, el sistema lo categoriza erróneamente como sedán, lo que representa una falla significativa al momento de diferenciar entre vehículos grandes y pequeños.

Figura 21

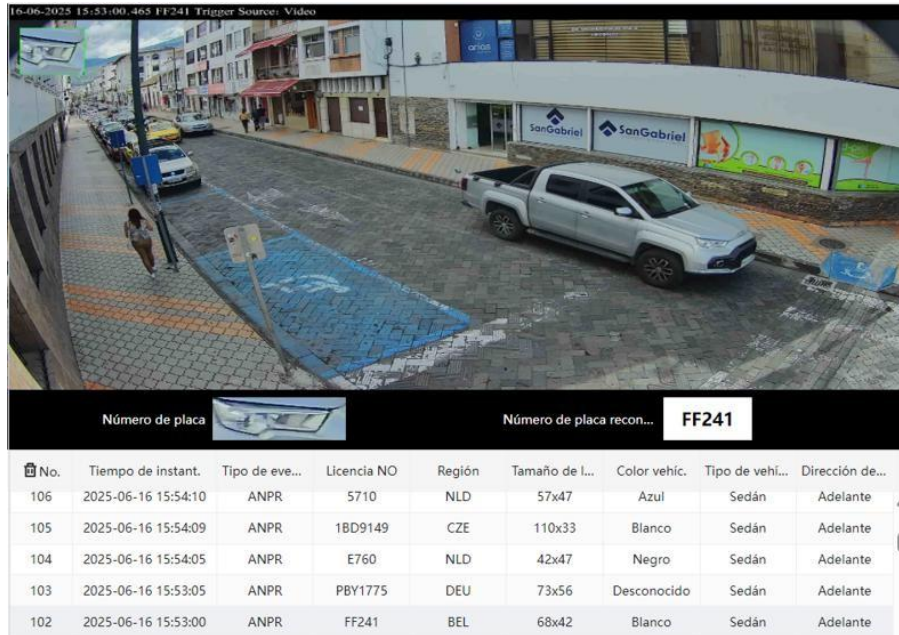
Ejemplo de detección de vehículos “camión”



En la **Figura 22** muestra uno de los errores que se generan comúnmente es la identificación de vehículo por categoría, en varios casos las camionetas son identificadas de manera errónea tomándolos como vehículos tipo sedan, lo cual significa un error muy significativo, especialmente a la hora de identificar los vehículos por su categoría. Al igual a la hora de tomar los datos de reconocimiento de placa no logra capturar de una manera correcta, registrando solamente dos letras y tres números lo que significa un registro impreciso en los análisis.

Figura 22

Ejemplo de detección de vehículos “camioneta”



4.5 Distribución horaria del tráfico vehicular

4.5.1 Flujo de tráfico en la calle Simón Bolívar

4.5.1.1 Flujo de tráfico por horas

En la se presenta el comportamiento horario del flujo vehicular total acumulado durante un mes en la calle Simón Bolívar, a partir de un conteo continuo de 24 horas. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical indica el número total de vehículos registrados por hora, junto con su participación porcentual respecto al total mensual.

Durante la madrugada, comprendida entre las 00:00h y las 05:00h, se registran los valores más bajos de circulación vehicular, concentrando en conjunto un porcentaje reducido del total mensual.

En este intervalo horario, las horas de menor flujo corresponden a las 02:00h, 03:00h y 04:00h,

con valores inferiores al 1 % del total mensual por hora, evidenciando una baja actividad vehicular asociada a la disminución de actividades urbanas nocturnas.

A partir de las 06:00h se observa un incremento marcado del flujo vehicular, alcanzando aproximadamente el 4,4 % del total mensual, lo que señala el inicio del periodo de mayor actividad diaria. El primer pico significativo se presenta entre las 07:00h y 09:00h, donde cada hora concentra entre el 7,5 % y 8,5 % del total de vehículos del mes, reflejando el impacto del inicio de las jornadas laborales, académicas y comerciales.

Durante las horas centrales del día, entre las 10:00h y 14:00h, el flujo vehicular se mantiene elevado y relativamente constante, aportando individualmente entre el 8,8 % y 9,4 % del total mensual. El máximo registro se presenta alrededor de las 13:00h, concentrando aproximadamente el 9,5 % del flujo total, lo que indica una alta demanda vial en este periodo.

Posteriormente, entre las 15:00h y 18:00h, se mantiene un flujo considerable, con valores cercanos al 8,5 % y 9,0 % por hora, asociado a la continuidad de actividades urbanas y al desplazamiento vespertino. Finalmente, a partir de las 20:00h, se observa una disminución progresiva del tránsito vehicular, pasando de aproximadamente el 6,3 % a las 20:00h, hasta valores cercanos al 1,7 % a las 23:00h, marcando el cierre del ciclo diario de movilidad.

Figura23 se presenta el comportamiento horario del flujo vehicular total acumulado durante un mes en la calle Simón Bolívar, a partir de un conteo continuo de 24 horas. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical indica el número total de vehículos registrados por hora, junto con su participación porcentual respecto al total mensual.

Durante la madrugada, comprendida entre las 00:00h y las 05:00h, se registran los valores más bajos de circulación vehicular, concentrando en conjunto un porcentaje reducido del total mensual. En este intervalo horario, las horas de menor flujo corresponden a las 02:00h, 03:00h y 04:00h, con valores inferiores al 1 % del total mensual por hora, evidenciando una baja actividad vehicular asociada a la disminución de actividades urbanas nocturnas.

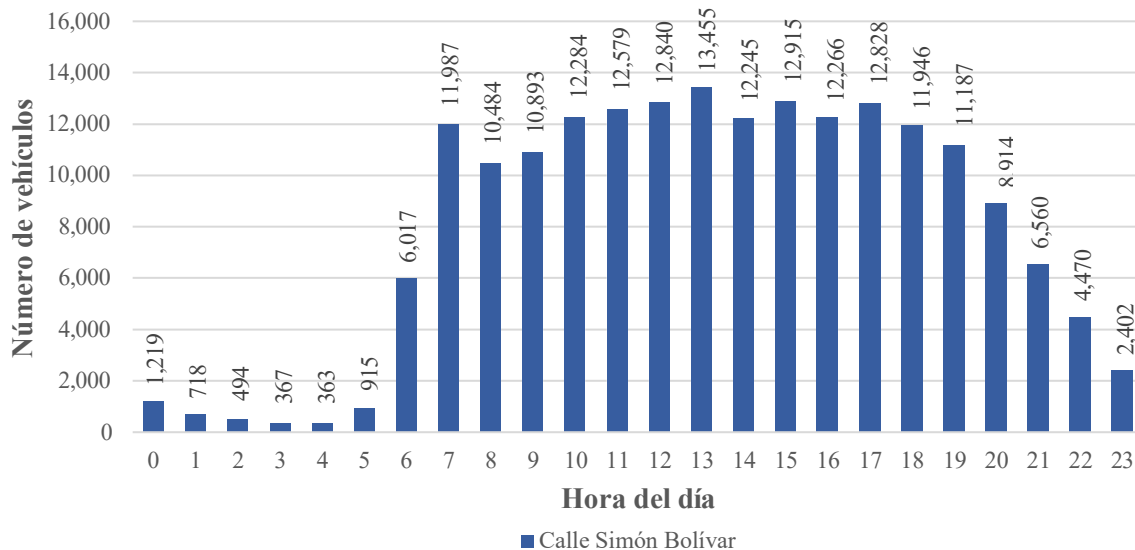
A partir de las 06:00h se observa un incremento marcado del flujo vehicular, alcanzando aproximadamente el 4,4 % del total mensual, lo que señala el inicio del periodo de mayor actividad diaria. El primer pico significativo se presenta entre las 07:00h y 09:00h, donde cada hora concentra entre el 7,5 % y 8,5 % del total de vehículos del mes, reflejando el impacto del inicio de las jornadas laborales, académicas y comerciales.

Durante las horas centrales del día, entre las 10:00h y 14:00h, el flujo vehicular se mantiene elevado y relativamente constante, aportando individualmente entre el 8,8 % y 9,4 % del total mensual. El máximo registro se presenta alrededor de las 13:00h, concentrando aproximadamente el 9,5 % del flujo total, lo que indica una alta demanda vial en este periodo.

Posteriormente, entre las 15:00h y 18:00h, se mantiene un flujo considerable, con valores cercanos al 8,5 % y 9,0 % por hora, asociado a la continuidad de actividades urbanas y al desplazamiento vespertino. Finalmente, a partir de las 20:00h, se observa una disminución progresiva del tránsito vehicular, pasando de aproximadamente el 6,3 % a las 20:00h, hasta valores cercanos al 1,7 % a las 23:00h, marcando el cierre del ciclo diario de movilidad.

Figura23

Flujo de tráfico de calle Simón Bolívar por horas



Este comportamiento horario evidencia un patrón urbano típico, caracterizado por una baja circulación nocturna, picos definidos en horas punta matutinas y vespertinas, y una elevada carga vehicular sostenida durante el día, lo cual resulta relevante para el análisis de su posible influencia en la calidad del aire.

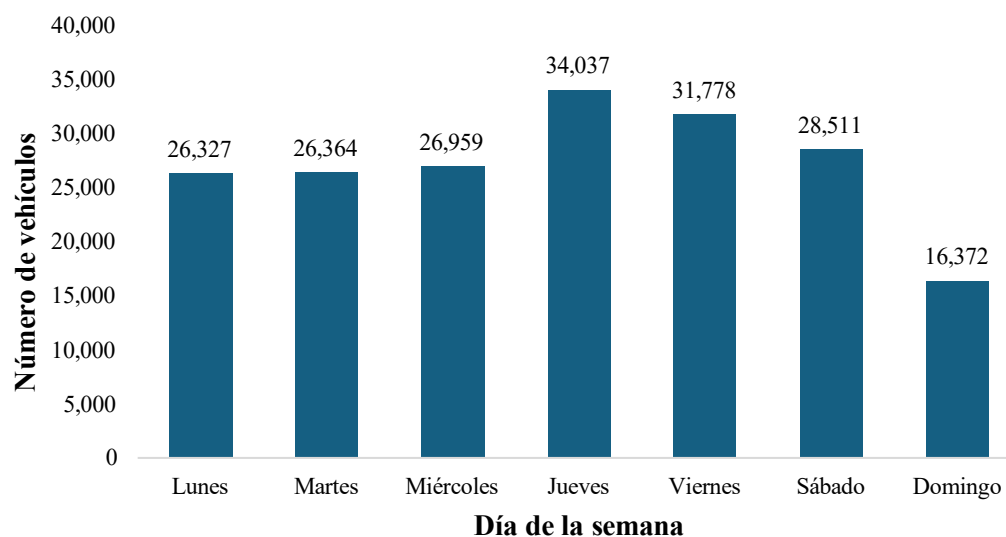
4.5.1.2 Flujo de tráfico por días

En la **Figura 24** nos muestra la cantidad total de vehículos por cada día durante el mes de mayo, en donde el eje horizontal nos muestra los días de la semana, mientras que en el eje vertical nos indica el total de vehículos en miles. En el recuento vehicular de todo el mes existen flujos alto de circulación intercalados con días de menor tráfico, el día con mayor flujo vehicular se concentra los jueves, con 34,037 vehículos representando el 17.89%, mientras que los viernes, con 31,778 vehículos representado un 16.70% respectivamente, lo que nos indica una intensificación del flujo vehicular en el cierre de la semana laboral. En contraste con los domingos, en donde se presenta el menor flujo vehicular, con 16,372 vehículos, equivalente al 8.60% del total mensual, reflejando

así una reducción significativa en la actividad vehicular. Los lunes, martes y miércoles tienen valores similares representando una variación entre 13.83% y 14.16%. Mientras que los sábados se observa una ligera elevación de flujo vehicular aumentando al 14.98%, asimilando que puede asociarse a actividades comerciales o recreativas. Cabe destacar que tanto como la primera y la última semana del mes presenta registros incompletos debidos a la limitación en el periodo de monitoreo.

Figura 24

Distribución diaria del flujo vehicular en la calle Simón Bolívar



4.5.2 Flujo de tráfico en la calle Miguel Oviedo

4.5.2.1 Flujo de tráfico por horas

En la **Figura 25** se presenta el comportamiento horario del flujo vehicular total acumulado durante un mes en la calle Miguel Oviedo, a partir de un conteo continuo de 24 horas. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical muestra el número total de vehículos registrados por hora, así como su participación porcentual respecto al total mensual.

Durante la madrugada, entre las 00:00h y las 05:00h, se registran los valores más bajos de circulación vehicular, concentrando en conjunto un porcentaje reducido del total mensual. En este intervalo, las horas de menor flujo corresponden a las 02:00h, 03:00h y 04:00h, con registros inferiores al 1 % del total mensual por hora, lo que evidencia una baja actividad vehicular nocturna en esta vía.

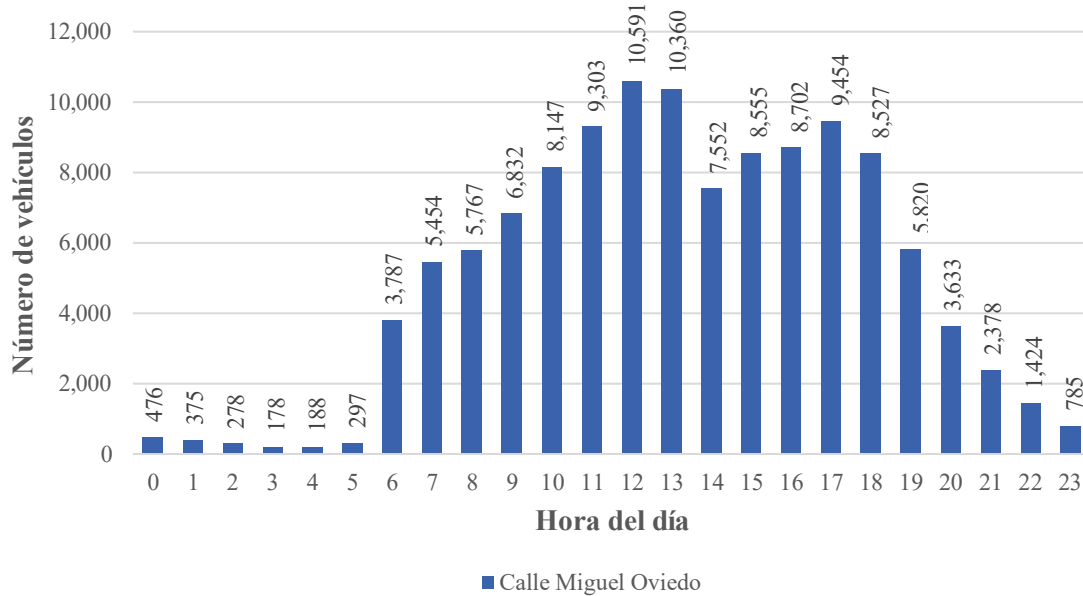
A partir de las 06:00h, se observa un incremento significativo del flujo vehicular, alcanzando aproximadamente el 4,3 % del total mensual, lo que marca el inicio del periodo de mayor movilidad diaria. El primer pico importante se presenta entre las 07:00h y 09:00h, donde cada hora concentra entre el 6,5 % y 7,8 % del total mensual, asociado principalmente al inicio de las actividades laborales, educativas y comerciales.

El máximo flujo vehicular se registra alrededor de las 12:00h y 13:00h, con valores que superan los 10 500 vehículos, representando aproximadamente el 8,8 %–9,1 % del total mensual por hora.

Este comportamiento indica una elevada demanda vial durante las horas centrales del día.

Figura 25

Flujo de tráfico de calle Miguel Oviedo por horas



Posteriormente, entre las 14:00h y 18:00h, el flujo vehicular se mantiene alto y relativamente constante, con porcentajes horarios cercanos al 7,5 % y 8,5 %, reflejando la continuidad de la actividad urbana y los desplazamientos vespertinos. A partir de las 19:00h, se evidencia una disminución progresiva del tránsito, pasando de aproximadamente el 5,0 % a las 19:00h, hasta valores cercanos al 0,7 % a las 23:00h, cuando finaliza el ciclo diario de movilidad.

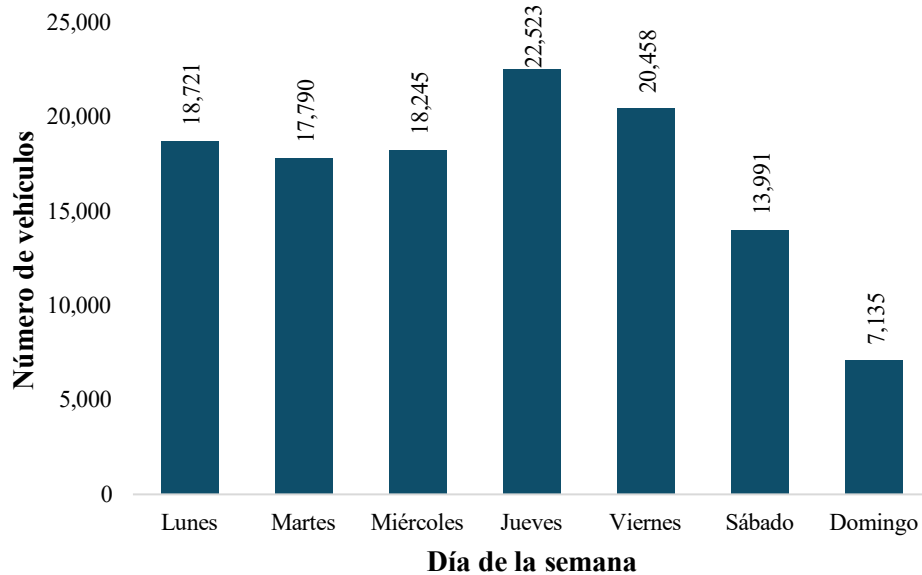
4.5.2.2 *Flujo de tráfico por días*

En la **Figura 26** indica la cantidad total de vehículos por cada día durante el mes de mayo en la calle Miguel Oviedo. El eje vertical representa el total de vehículos mientras que en el eje horizontal se encuentran los días de la semana. El gráfico muestra una variación en el flujo

vehicular entre días distintos, con picos de alta circulación intercalados con jornadas de menor tráfico.

Figura 26

Flujo de tráfico de calle Miguel Oviedo por días



El día con mayor flujo vehicular corresponde al jueves, con 22,523 vehículos representando el 19.03% del total semanal. Le sigue el viernes, con un total de 20,458 vehículos equivalente al 17.29%, lo que indica un comportamiento similar a la calle Simón Bolívar en donde la mayor intensificación de tránsito se registra en los últimos días de la semana. En contraste con el domingo que al igual es uno de los días en donde no existe mucha afluencia vehicular con 7,135 vehículos correspondiendo al 6.03% del total. Mientras tanto los lunes, martes y miércoles tienen valores similares representando entre el 15.82%, 14.63% y 15.41% respectivamente, lo que indica una distribución relativa estable durante el inicio de semana. Por su parte, el sábado registra 13,991

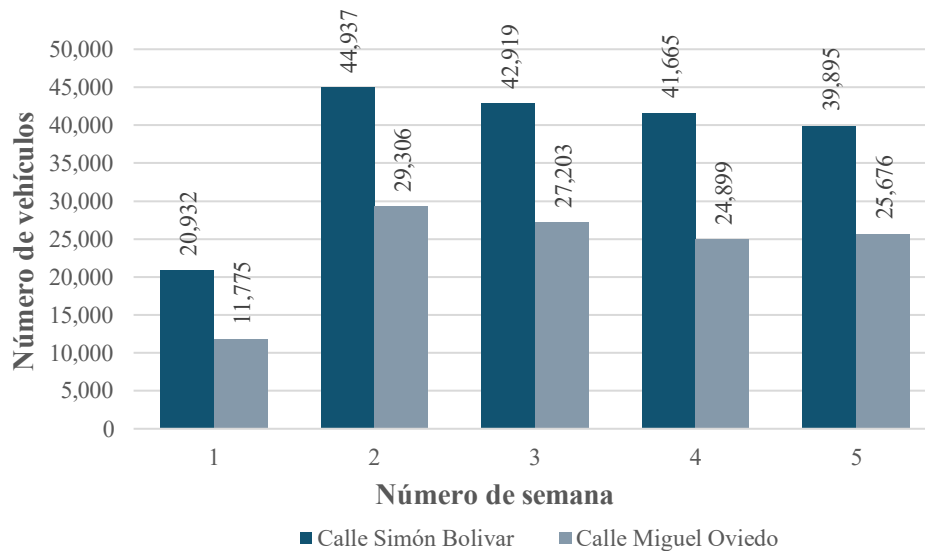
vehículos, representando un 11.82% del total semanal asociado a una menor actividad comercial o laboral.

4.6 Comparación entre las calles

En la **Figura 27** presenta la comparación del flujo vehicular semanal entre las calles Simón Bolívar y Miguel Oviedo, a lo largo de cinco semanas de monitoreo. En el eje horizontal se muestra el número de semana, mientras que en el eje vertical se representa el número total de vehículos contabilizados en cada semana, manteniendo el mismo criterio utilizado en los gráficos anteriores. El color azul oscuro corresponde a la calle Simón Bolívar, mientras que el color gris claro representa a la calle Miguel Oviedo.

Figura 27

Comparación de tráfico vehicular entre calles



A lo largo de todo el periodo analizado, la calle Simón Bolívar presenta un mayor flujo vehicular semanal en comparación con la calle Miguel Oviedo, lo que evidencia que la calle Bolívar es una

vía de mayor demanda de tránsito. Por ejemplo, durante la segunda semana, la calle Simón Bolívar registró un total aproximado de 44,937 vehículos, mientras que la calle Miguel Oviedo alcanzó 29,306 vehículos, mostrando una diferencia considerable entre ambas vías.

De manera similar, en la tercera y cuarta semana se mantiene esta tendencia, con valores de 42,919 y 41,665 vehículos para la calle Simón Bolívar, frente a 27,203 y 24,899 vehículos registrados en la calle Miguel Oviedo, respectivamente. En la quinta semana, aunque se observa una ligera disminución del flujo vehicular en ambas calles, la diferencia continúa siendo significativa, con 39,895 vehículos en la calle Bolívar y 25,676 vehículos en la calle Oviedo.

Finalmente, al analizar el recuento total acumulado durante las cinco semanas, se evidencia que la calle Simón Bolívar presenta un volumen vehicular notablemente superior al de la calle Miguel Oviedo, confirmando que la primera constituye una de las vías más transitadas del área de estudio. Esta diferencia en la carga vehicular resulta relevante para el análisis comparativo de su posible influencia sobre las concentraciones de contaminantes atmosféricos registradas en cada sector.

4.6.1 Análisis por semanas entre las dos calles

La **Tabla 10** nos indica el total de vehículos contabilizados durante el mes de mayo entre las dos calles de estudio. En la calle Simón Bolívar, la semana 1 registro un flujo vehicular muy bajo, con 20,932 vehículos, esto debido a que esta semana solo contaba con cuatro días. A partir de la semana 2 hasta la semana 5, el volumen vehicular se mantuvo constante, con cifras de 39,000 y 44,000 vehículos. En total durante el mes de mayo se contabilizo 190,348 vehículos en esta calle, lo que indica un índice de circulación vehicular alta sostenida a lo largo del periodo de pruebas. A demás se calcula un promedio semanal de 38,070 vehículos con una desviación estándar de 9,774.92

vehículos, representando un coeficiente de variación del 25.62%, lo que indica una variabilidad moderada pero estable en el flujo vehicular.

Por su parte, la calle Miguel Oviedo se registró un total de 11,775 vehículos en la semana, la semana 2 tuvo el número más alto de conteo vehicular con 29,310 vehículos, mientras que la semana 3,4 y 5 tiene cifras constantes entre 24,000 y 27,000 vehículos. Durante el mes se obtuvo un conteo total de 118,863 vehículos, lo que permite caracterizar su dinámica de tránsito durante el mes de mayo, mostrándonos un promedio semanal de 23,773.60 vehículos y una desviación estándar de 6,914.92 vehículos, con un coeficiente de variación del 29.09%, el cual es apenas superior al de la calle Simón Bolívar, lo que significa una mayor variabilidad en el flujo vehicular. La comparación entre ambas calles revela un comportamiento consistente, la calle Simón Bolívar es la más transitada alcanzando casi el doble del porcentaje registrado en la calle Miguel Oviedo, este fenómeno se debe a que la calle Simón Bolívar se conecta con distintas instituciones educativas, centros gubernamentales, sitios de recreación, una calle de alta actividad comercial.

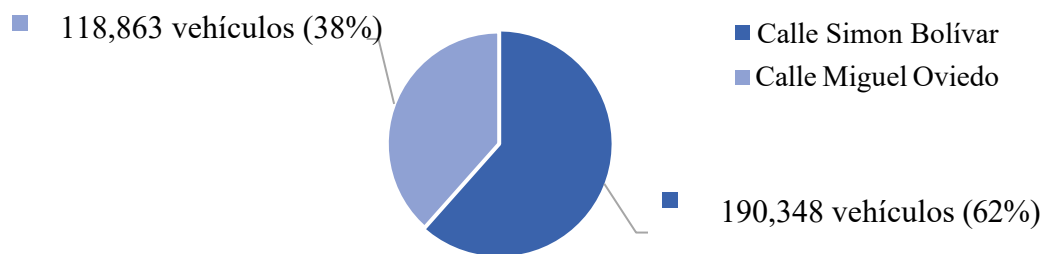
Tabla 10 Comparación de número de vehículos por semanas

Semana	Vehículos (Calle Simón Bolívar)	Vehículos (Calle Miguel Oviedo)
Semana 1	20,932	11,775
Semana 2	44,937	29,310
Semana 3	42,919	27,203
Semana 4	41,665	24,899
Semana 5	39,895	25,676
Total	190,348	118,863
Promedio	38,069.6	23,773.6
Desviación estándar	9,774.92	6,914.92
Coeficiente de variación	25.62%	29.09%

Esta diferencia también se ve reflejada en **Figura 28**, en donde se observa que el 62% del total de vehículos registrados durante el periodo de pruebas transitaron por la calle Simón Bolívar, frente al 38% correspondiente a la calle Miguel Oviedo.

Figura 28

Porcentaje de número de vehículos por calle



4.7 Concentración promedio de contaminantes

4.7.1 Límites establecidos por normativas ambientales para concentraciones PM_{2.5}

Durante el mes de mayo, las concentraciones de PM_{2.5} se evaluaron en relación con dos referentes principales: el límite nacional establecido por la normativa ecuatoriana (NECA), fijado en 50 µg/m³ como valor máximo permitido, y el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que propone un umbral mucho más estricto de 15 µg/m³. Estos dos parámetros sirven como guía para interpretar la calidad del aire y determinar el nivel de riesgo potencial para la salud asociado a la presencia de material particulado fino.

4.7.2 Promedio Material Particulado 2.5

En la presente se muestra el comportamiento horario del material particulado PM_{2.5}, obtenido a partir de los promedios semanales correspondientes a la segunda, tercera, cuarta y quinta semana de monitoreo. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical

muestra las concentraciones promedio de PM_{2.5} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, junto con los límites establecidos por la normativa de la OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la normativa NECA ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

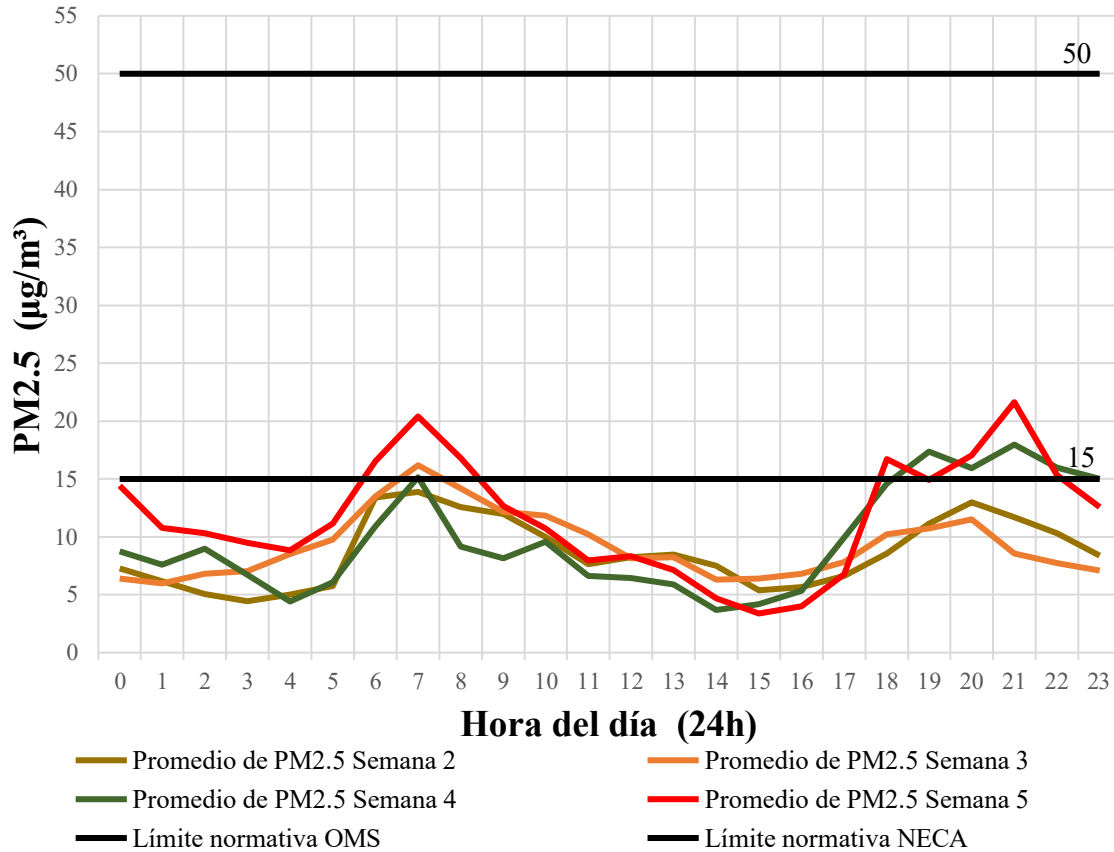
Durante la madrugada, entre las 00:00h y 05:00h, todas las semanas analizadas presentan concentraciones bajas y relativamente estables, con valores que se mantienen muy por debajo de ambos límites normativos, lo que evidencia una menor presencia de fuentes emisoras en este periodo.

Figura29 presenta el comportamiento horario del material particulado PM_{2.5}, obtenido a partir de los promedios semanales correspondientes a la segunda, tercera, cuarta y quinta semana de monitoreo. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical muestra las concentraciones promedio de PM_{2.5} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, junto con los límites establecidos por la normativa de la OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la normativa NECA ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Durante la madrugada, entre las 00:00h y 05:00h, todas las semanas analizadas presentan concentraciones bajas y relativamente estables, con valores que se mantienen muy por debajo de ambos límites normativos, lo que evidencia una menor presencia de fuentes emisoras en este periodo.

Figura29

Promedios por hora de material particulado 2.5



A partir de las 06:00h se observa un incremento progresivo de las concentraciones, alcanzando un primer pico matutino entre las 07:00h y 08:00h, siendo más evidente en la quinta semana, donde los valores se aproximan e incluso superan el límite recomendado por la OMS, reflejando una mayor intensidad de emisiones durante las primeras horas de actividad diaria.

Posteriormente, las concentraciones disminuyen de forma gradual hacia el mediodía y primeras horas de la tarde, registrándose los valores más bajos entre las 14:00h y 16:00h en todas las semanas evaluadas. Sin embargo, a partir de este intervalo se identifica un segundo incremento durante la tarde-noche, con un nuevo pico entre las 19:00h y 21:00h, nuevamente más marcado en

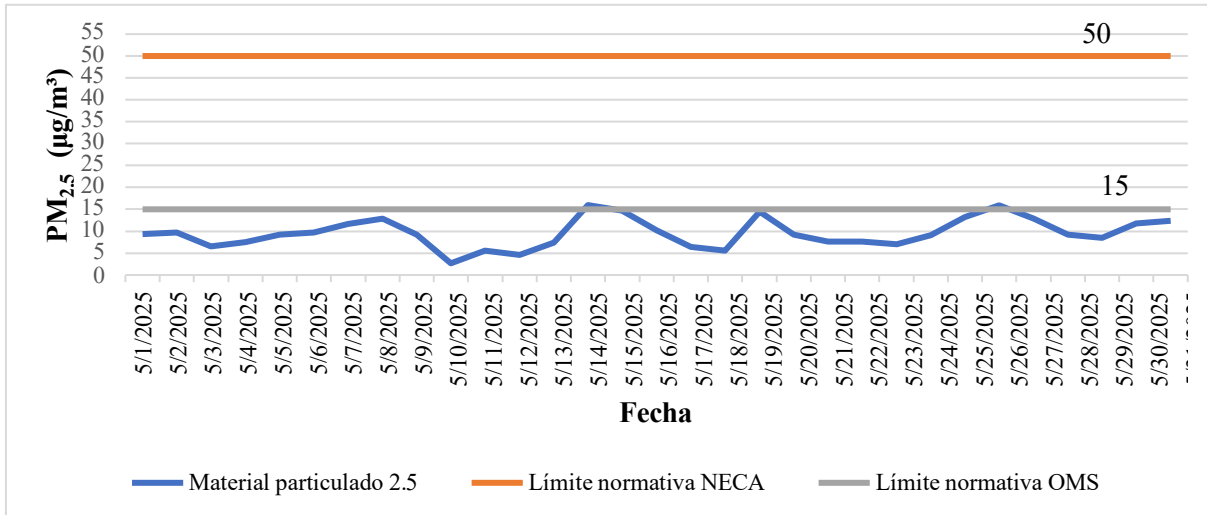
la quinta y cuarta semana, lo que sugiere la recurrencia de episodios diarios con mayores concentraciones que influyen en los promedios semanales observados.

En la **Figura 30** se presenta el promedio diario de las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante el mes de mayo, junto a los límites establecidos por las normativas. Se observa que, en fechas específicas, se registraron valores elevados que sobrepasaron el límite recomendado por la OMS, siendo estos los días 14 y 26 con concentraciones de $15,97 \mu g/m^3$, $15,93 \mu g/m^3$ respectivamente. También se destacan el jueves 15 y el lunes 19, con concentraciones de $15 \mu g/m^3$, y $14,50 \mu g/m^3$, muy cercanas al umbral internacional.

Mientras que los puntos más bajos son en los sábados 3 y 10, lunes 12 y domingo 8, siendo estos la mayoría días de fin de semana, sus promedios varían entre $2,67 \mu g/m^3$ y $6,51 \mu g/m^3$, que no significan un riesgo para la salud humana, estos puntos probablemente se dan debido a que los fines de semana no existe alta afluencia vehicular.

Figura 30

Promedios diarios de PM_{2.5}



Tanto en la gráfica presenta el comportamiento horario del material particulado PM_{2.5}, obtenido a partir de los promedios semanales correspondientes a la segunda, tercera, cuarta y quinta semana de monitoreo. El eje horizontal representa las horas del día en formato de 24 horas, mientras que el eje vertical muestra las concentraciones promedio de PM_{2.5} en µg/m³, junto con los límites establecidos por la normativa de la OMS (15 µg/m³) y la normativa NECA (50 µg/m³).

Durante la madrugada, entre las 00:00h y 05:00h, todas las semanas analizadas presentan concentraciones bajas y relativamente estables, con valores que se mantienen muy por debajo de ambos límites normativos, lo que evidencia una menor presencia de fuentes emisoras en este periodo.

Figura29 y **Figura 30** solo se ha superado el límite recomendado por la OMS en situaciones puntuales sin embargo se mantienen por muy debajo del límite nacional de la normativa ecuatoriana, evidenciando que, aunque las concentraciones cumplen con la normativa local,

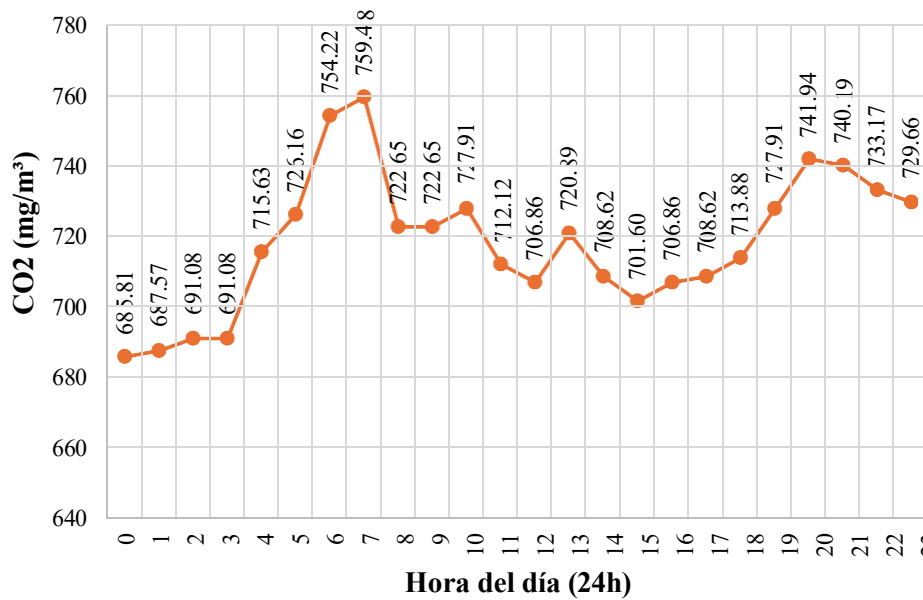
podrían representar un riesgo para la salud según estándares internacionales más estrictos. La normativa ecuatoriana, al ser más permisiva, podría no reflejar adecuadamente los impactos reales sobre la calidad del aire y la salud pública.

4.7.3 Promedio de CO₂

En la **Figura 31** se presenta el comportamiento del CO₂ durante el día 21 de mayo, seleccionado como día de referencia. Se observa que en las primeras horas de la mañana los niveles de concentración son bajos. A partir de las 05:00h, comienza un incremento progresivo que alcanza su primer pico máximo a las 07:00h. Posteriormente, los niveles descienden de forma continua hasta las 12:00h, momento a partir del cual se registra un nuevo ascenso moderado que culmina a las 13:00h. Finalmente, se identifica una segunda hora pico a las 20:00h, lo que muestra que hay dos picos de contaminación a lo largo del día.

Figura 31

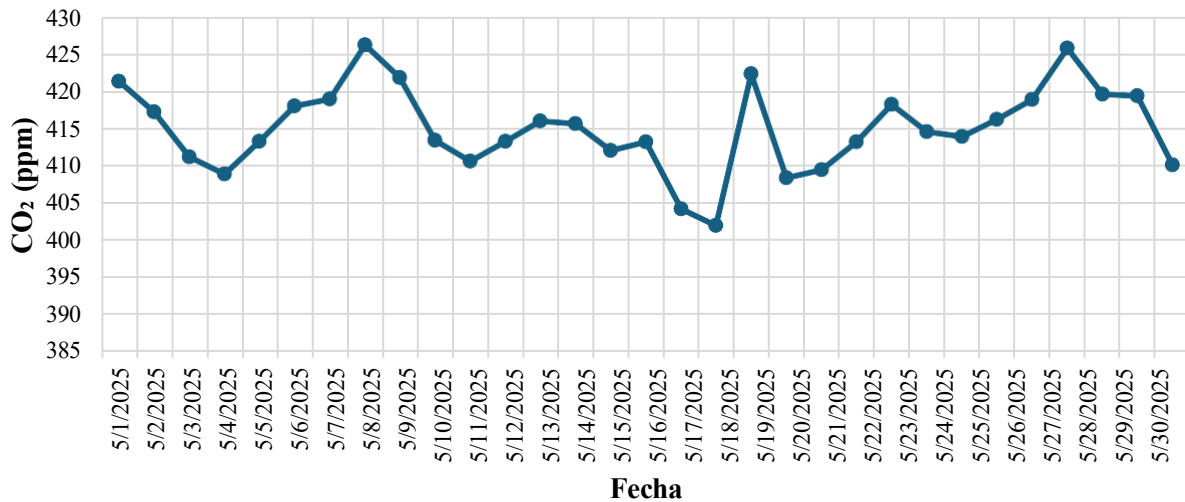
Promedios por hora de CO₂



En la **Figura 32** se muestra el comportamiento del CO₂ durante todo el mes de mayo, evidenciando nueve fechas con concentraciones promedio elevadas. Todas estas corresponden a días laborables, lo cual guarda coherencia con el mayor flujo vehicular registrado entre semana. En contraste, los niveles más bajos se observan durante los fines de semana, siendo el domingo 18 el día con la menor concentración de CO₂ en todo el mes, lo que refleja una significativa reducción en la actividad vehicular.

Figura 32

Promedios diarios de CO₂



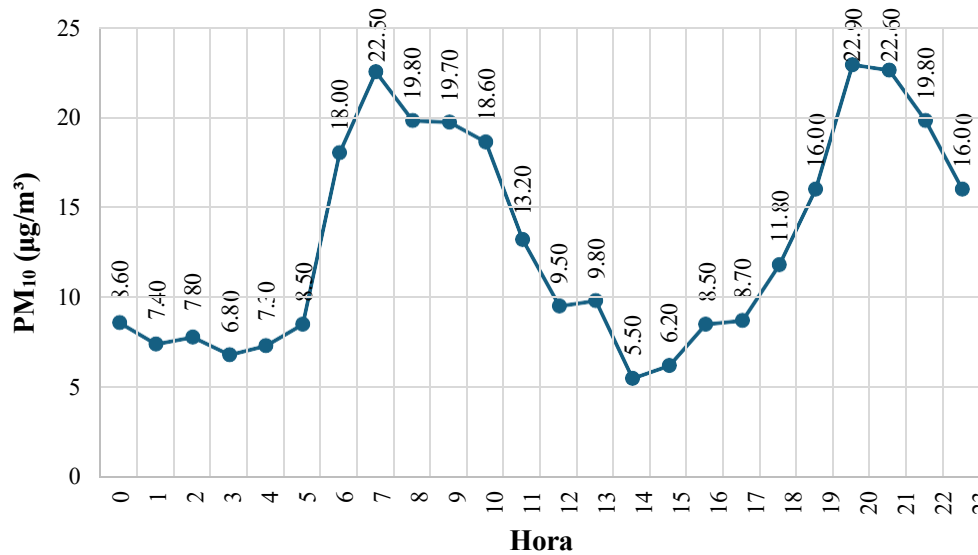
4.7.4 Promedio Material Particulado 10

En la **Figura 33** correspondiente se observa el comportamiento diario del material particulado PM₁₀ durante el día 8 de mayo. El eje vertical representa el promedio general en unidades de µg/m³, mientras que el eje horizontal muestra las horas del día en formato de 24 horas. Se identifica un primer pico de concentración a las 07:00h, coincidiendo con el incremento del flujo vehicular asociado al inicio de las actividades laborales y escolares. A medida que avanza el día, se registra

una disminución progresiva hasta alcanzar uno de los valores más bajos a las 16:00h. Posteriormente, se evidencia un nuevo aumento entre las 18:00h y las 21:00h, correspondiente al segundo periodo de mayor actividad vehicular.

Figura 33

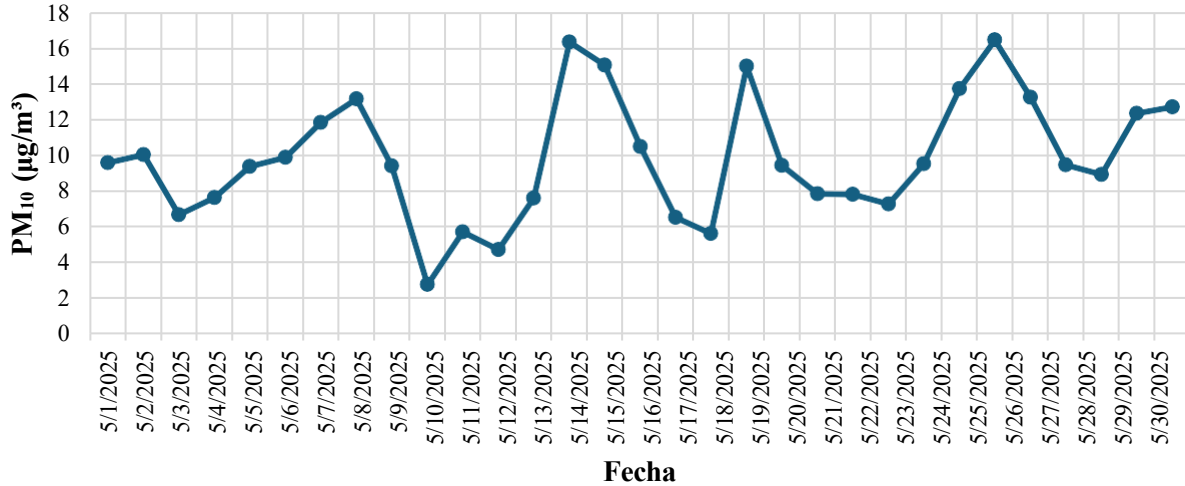
Promedios por horas de PM₁₀



Mientras tanto en la **Figura 34** se presenta el comportamiento del PM₁₀ a lo largo del mes de mayo, utilizando el promedio diario como referencia. El eje vertical muestra las concentraciones en µg/m³, mientras que el eje horizontal representa cada día del mes. Se identifican dos picos significativos: el primero ocurre el miércoles 14 y el segundo el lunes 26, ambos días laborables, lo cual resulta coherente con el elevado flujo vehicular típico de la semana. En contraste, los valores más bajos se registran únicamente en dos fechas, lo que representa un comportamiento atípico respecto a las demás gráficas analizadas. A pesar de tratarse de fines de semana, estos días presentan concentraciones relativamente constantes, lo que sugiere una dinámica diferente en la emisión de material particulado.

Figura 34

Promedios diarios de PM₁₀



4.7.5 Índices de NO_x

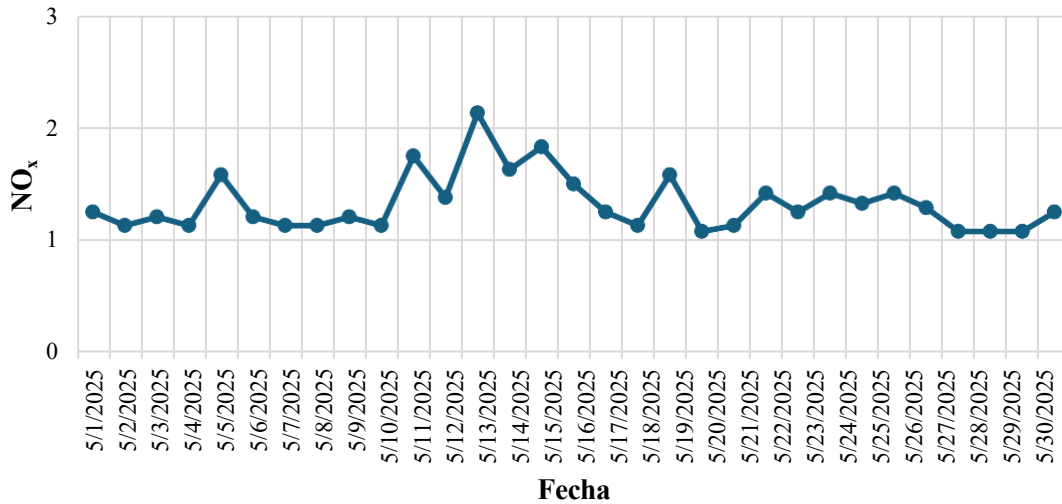
En la se presenta el promedio diario de óxidos de nitrógeno (NO_x) durante el mes de mayo, evidenciando tanto picos altos como bajos en las concentraciones. Los días 11, 13 y 15 destacan por registrar los valores más elevados, coincidiendo con días laborables, lo cual resulta coherente con el incremento del flujo vehicular típico de la semana. En contraste, los días con concentraciones más bajas se distribuyen de manera casi continua a lo largo del mes, predominando durante los fines de semana.

Figura 35 se presenta el promedio diario de óxidos de nitrógeno (NO_x) durante el mes de mayo, evidenciando tanto picos altos como bajos en las concentraciones. Los días 11, 13 y 15 destacan por registrar los valores más elevados, coincidiendo con días laborables, lo cual resulta coherente con el incremento del flujo vehicular típico de la semana. En contraste, los días con

concentraciones más bajas se distribuyen de manera casi continua a lo largo del mes, predominando durante los fines de semana.

Figura 35

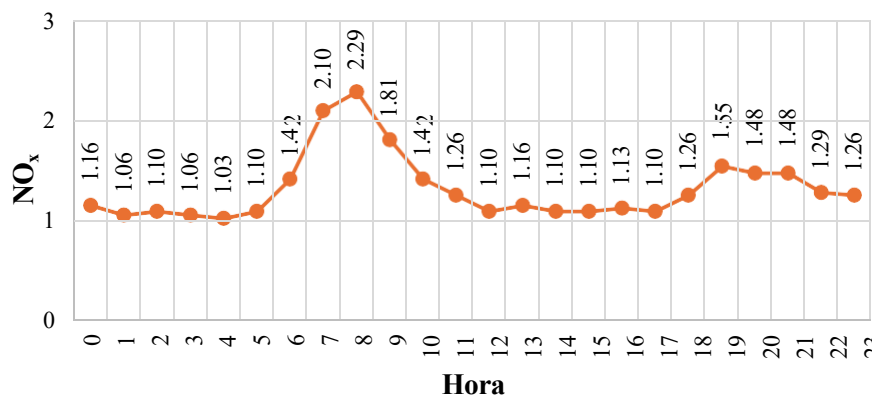
Promedio de NO_x por fecha



Por su parte, la **Figura 36** muestra la variación horaria de las concentraciones promedio de NO_x, calculadas a partir de todos los registros del mes. Se identifican varios picos a lo largo del día, siendo los más pronunciados entre las 07:00h y 08:00h, lo cual se asocia directamente con el aumento del tránsito vehicular durante el inicio de las actividades laborales y escolares. A medida que transcurre el día, las concentraciones presentan fluctuaciones moderadas, alcanzando una tendencia más estable en las horas posteriores.

Figura 36

Promedios por hora de NO_x

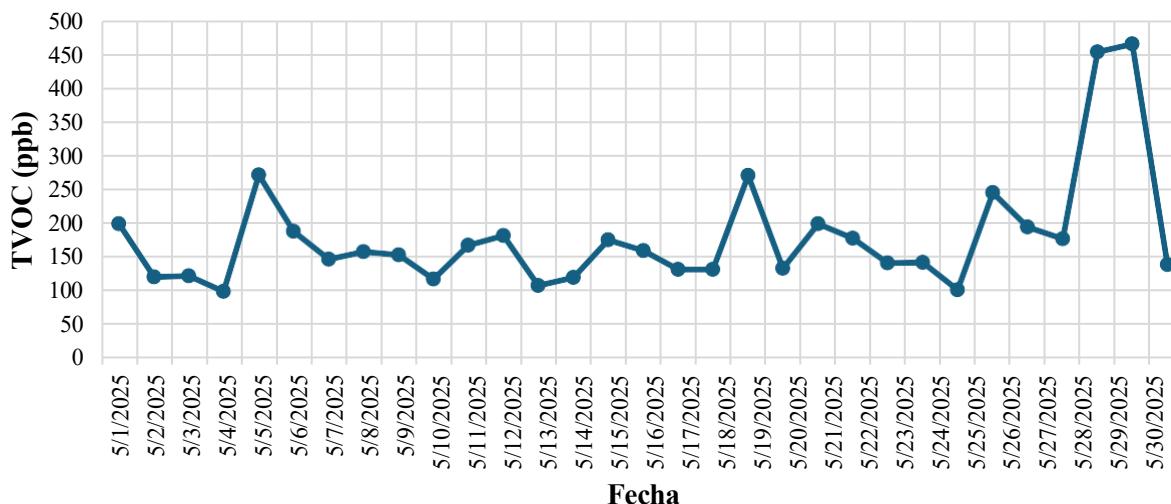


4.7.6 Índices de TVOC

En la **Figura 37** se presenta el promedio diario de compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), medidos en partes por billón (ppb), durante el mes de mayo. A lo largo del mes, los niveles se mantienen relativamente estables, oscilando entre 0 y 200 ppb, sin variaciones significativas entre días laborables y fines de semana. Sin embargo, hacia el final del periodo de monitoreo, específicamente entre el viernes 30 y el sábado 31 de mayo, se observa un incremento abrupto en los valores, alcanzando el pico más alto registrado, cercano a los 500 ppb. Este comportamiento contrasta notablemente con la tendencia previa, lo que sugiere la presencia de un evento puntual o una alteración en las condiciones ambientales que afectó la concentración de TVOC en esos días.

Figura 37

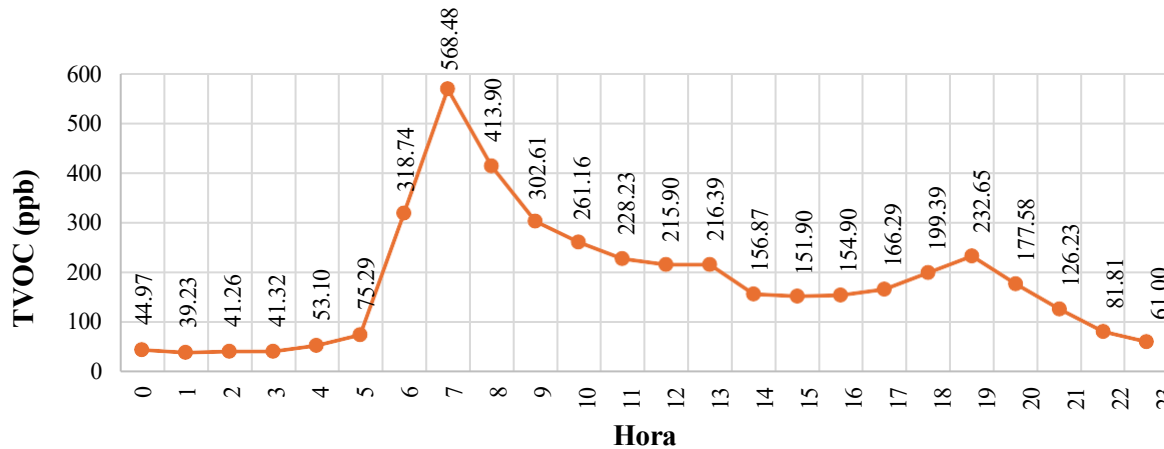
Promedio de TVOC por fecha



La **Figura 38** muestra las concentraciones promedio por hora de compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC) durante un periodo de 24 horas, calculadas a partir de todos los datos registrados durante el mes de mayo. Se observa un pico máximo a las 07:00h, con un valor de 586,48 ppb, que coincide con el inicio de las actividades laborales y escolares, lo que sugiere una mayor emisión de contaminantes en ese horario. Posteriormente, los niveles disminuyen progresivamente, alcanzando una fase de relativa estabilidad entre las 12:00h y las 16:0h, con valores cercanos a 160,99 ppb. A partir de las 17:00h, se registra una nueva variación descendente, con concentraciones mínimas cercanas a 61,00 ppb hacia el final del día. Este comportamiento refleja un patrón diario consistente, influenciado por las dinámicas urbanas y el flujo vehicular característico de la ciudad.

Figura 38

Promedio mensual de TVOC por hora



4.8 Relación entre flujo vehicular y contaminación

4.8.1 Correlación de contaminación con el tráfico vehicular

4.8.1.1 *CO₂ vs conteo vehicular*

En esta **muestra la** relación entre el tráfico vehicular y las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) durante el mes de mayo. En el eje horizontal se representan las fechas de recolección diaria, mientras que el eje vertical izquierdo indica el promedio diario del conteo vehicular, con valores que oscilan entre 4,000 y 14,000 vehículos. Por su parte, el eje vertical derecho muestra las concentraciones promedio de CO₂, en un rango de 400 a 430 partes por millón (ppm).

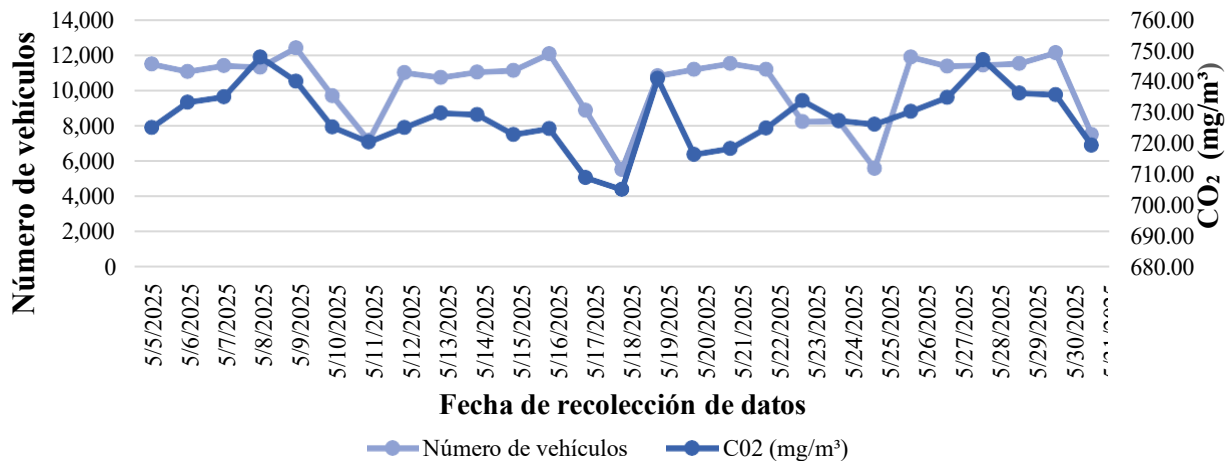
A lo largo del gráfico se observa que las variaciones en la cantidad de vehículos guardan una tendencia similar a las fluctuaciones en los niveles de CO₂. Es decir, los días con mayor flujo vehicular coinciden con aumentos en la concentración de CO₂, mientras que en los días con menor tráfico se registran reducciones en dicho contaminante. Este comportamiento es coherente con el hecho de que los vehículos son una fuente directa de emisiones de CO₂, especialmente en zonas urbanas con alta densidad de tránsito.

Figura 39 muestra la relación entre el tráfico vehicular y las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) durante el mes de mayo. En el eje horizontal se representan las fechas de recolección diaria, mientras que el eje vertical izquierdo indica el promedio diario del conteo vehicular, con valores que oscilan entre 4,000 y 14,000 vehículos. Por su parte, el eje vertical derecho muestra las concentraciones promedio de CO₂, en un rango de 400 a 430 partes por millón (ppm).

A lo largo del gráfico se observa que las variaciones en la cantidad de vehículos guardan una tendencia similar a las fluctuaciones en los niveles de CO₂. Es decir, los días con mayor flujo vehicular coinciden con aumentos en la concentración de CO₂, mientras que en los días con menor tráfico se registran reducciones en dicho contaminante. Este comportamiento es coherente con el hecho de que los vehículos son una fuente directa de emisiones de CO₂, especialmente en zonas urbanas con alta densidad de tránsito.

Figura 39

Coeficiente de correlación entre número de vehículos y promedio diario de CO₂

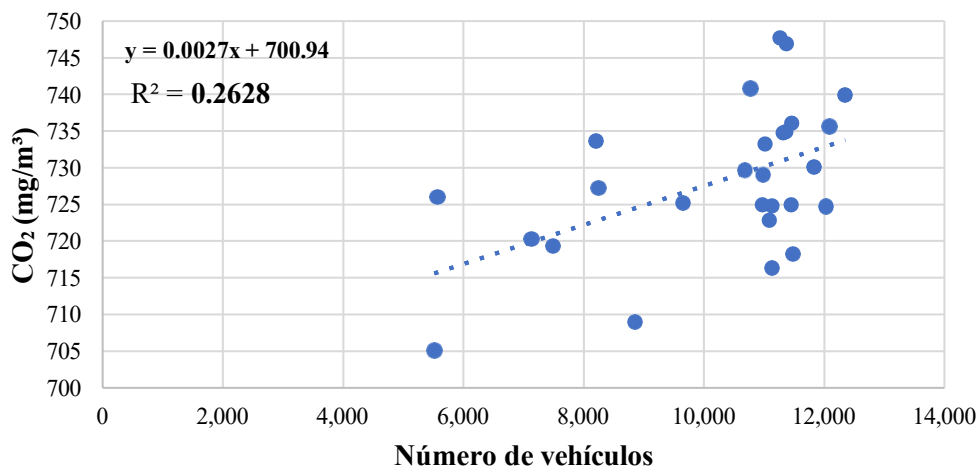


A partir de los datos obtenidos se en la **Figura 39** se calculó el coeficiente de correlación, cuyo valor es 0.5126. Este resultado indica una correlación moderada positiva entre ambas variables, lo que significa que, en general, a medida que aumenta el número de vehículos, también tiende a incrementarse la concentración de CO₂. Aunque no se trata de una correlación perfecta, el valor obtenido sugiere que el tráfico vehicular es un factor relevante en la variabilidad de los niveles de CO₂ registrados en la ciudad.

La **Figura 40** refuerza la relación positiva entre el número de vehículos y las concentraciones de CO₂ en el ambiente, evidenciada también en la **Figura 39**. El gráfico de dispersión muestra que, aunque la correlación no es fuerte ($R^2 = 0.2628$), sí es significativa, indicando que el tráfico vehicular explica parcialmente la variabilidad en los niveles de CO₂.

Figura 40

Gráfico de dispersión entre número de vehículos y promedio diario de CO₂



La ecuación de la recta de tendencia sugiere que, por cada 1,000 vehículos adicionales, la concentración de CO₂ aumenta en aproximadamente 1.4 ppm. Estos resultados respaldan la

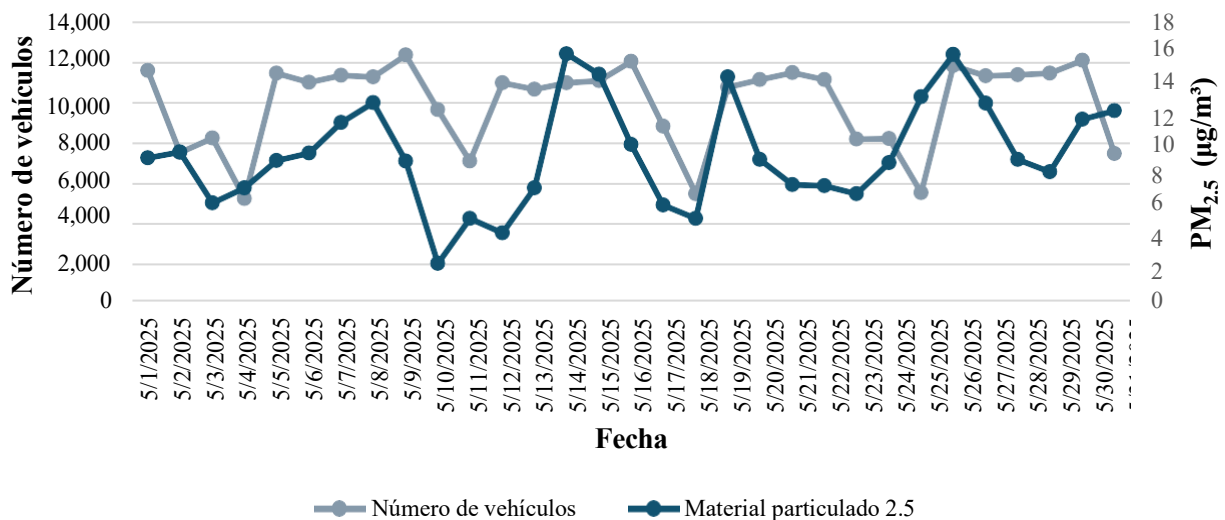
influencia del tránsito en la calidad del aire y subrayan la importancia de implementar estrategias de movilidad sostenible y control de emisiones en entornos urbanos.

4.8.1.2 *PM_{2.5} vs conteo vehicular*

En la **Figura 41** se puede observar la correlación entre el conteo vehicular y el material particulado 2.5 durante todo el mes de prueba, la gráfica nos muestra en su eje horizontal los días de prueba, mientras que al lado izquierdo del eje vertical el conteo vehicular, por su parte en el lado derecho el promedio general del material particulado en sus debidas unidades de ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 41

Coefficiente de relación entre número de vehículos y promedio diario de PM_{2.5}



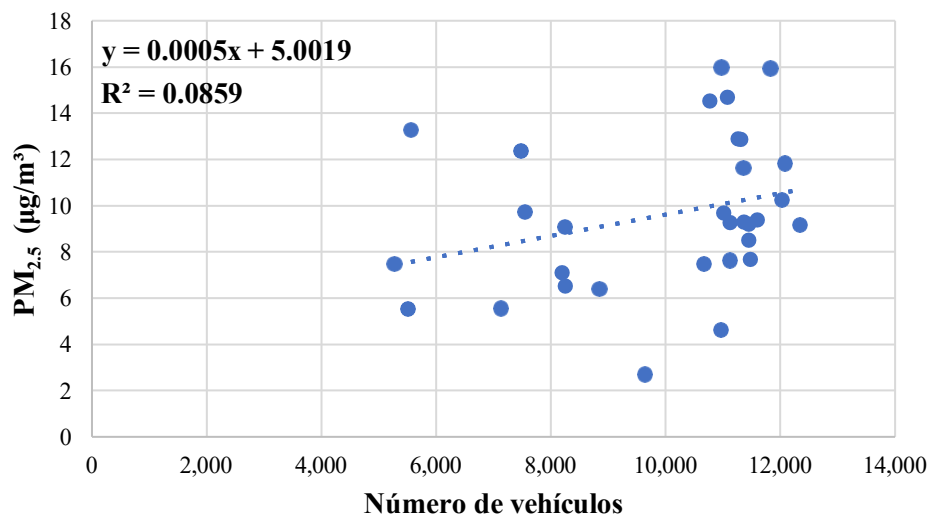
En las líneas de secuencia se observa un comportamiento no muy parejo entre las dos variables, las emisiones si están acorde al aumento y disminución del tráfico vehicular, pero en algunos casos es muy a lo contrario, dándonos así un coeficiente de correlación de 0.29 el cual es una correlación muy débil, lo que nos indica que existe una correlación sí, pero es muy muy baja. Esto puede

deberse a varios factores que implican en los resultados, principalmente a que los vehículos a gasolina no emiten mucho material particulado como vehículos de encendido por compresión.

En la **Figura 42** se presenta un gráfico de dispersión que analiza la relación entre el número de vehículos registrados diariamente y las concentraciones promedio de material particulado fino ($PM_{2.5}$) durante el mes de mayo. La ecuación de la recta de tendencia es $y = 0.0005x + 5.0019$, lo que indica que, por cada 1.000 vehículos adicionales, la concentración de $PM_{2.5}$ aumenta en aproximadamente $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, el coeficiente de determinación $R^2 = 0.0859$ revela que solo el 8.59% de la variabilidad en los niveles de $PM_{2.5}$ puede explicarse por el tráfico vehicular, lo que sugiere una correlación débil.

Figura 42

Gráfico de dispersión entre número de vehículos y promedio diario de $PM_{2.5}$



Este resultado coincide con el coeficiente de correlación de 0.29 observado en la **Figura 41**, confirmando que, aunque existe cierta relación entre ambas variables, no es consistente ni significativa. Esta baja correlación puede atribuirse a factores como la predominancia de vehículos

a gasolina, que emiten menos material particulado que los de diésel, así como a condiciones meteorológicas, que también influyen en los niveles de $PM_{2.5}$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La zona de estudio seleccionada presentó características representativas de una vía urbana con alta carga vehicular, debido a que conecta varios puntos estratégicos de la ciudad de Ibarra y forma parte de una de las principales arterias del centro urbano. Estas condiciones

permitieron analizar el comportamiento del tráfico en un entorno real y de alta actividad diaria, convirtiendo a la zona en un punto estratégico para futuras iniciativas de monitoreo ambiental urbano. Sin embargo, al encontrarse dentro del centro histórico de la ciudad, la circulación de vehículos pesados es limitada, lo que influyó en que las concentraciones de contaminantes no presenten variaciones extremas. Esta condición contribuyó a que la relación entre el tráfico vehicular y la calidad del aire muestre una correlación moderada y con alta dispersión, evidenciando que el tipo de vía y la composición del parque automotor condicionan el impacto del tráfico sobre la contaminación atmosférica.

- La integración de sensores de calidad del aire de bajo costo con el sistema de monitoreo permitió registrar de manera continua concentraciones de PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, NO_x y TVOC, demostrando que este tipo de equipamiento es técnicamente viable para estudios urbanos exploratorios. La metodología empleada representa una alternativa sustentable y accesible, especialmente para investigaciones de pequeña y mediana escala, al requerir una inversión limitada sin comprometer la continuidad de los datos. No obstante, la precisión inherente a los sensores de bajo costo influyó en la dispersión de los resultados, dificultando la obtención de correlaciones fuertes entre el flujo vehicular y los contaminantes medidos, particularmente en escenarios donde las variaciones de concentración son moderadas.
- El sistema de conteo vehicular automatizado mediante cámaras ANPR permitió caracterizar de forma eficiente el flujo vehicular, identificando volúmenes horarios, patrones diarios y la composición general del parque automotor. La implementación de esta tecnología resultó confiable, presentando un bajo porcentaje de error del 0,73 % en el registro del flujo vehicular, lo que respalda la validez de los datos obtenidos.

Sin embargo, se identificaron imprecisiones en la clasificación del tipo de vehículo, principalmente en unidades de mayor tamaño, lo que introduce incertidumbre al relacionar categorías vehiculares específicas con los niveles de contaminación atmosférica.

- La campaña de medición permitió obtener una visión integral del comportamiento del tráfico vehicular y la calidad del aire en la zona de estudio. Durante el periodo de monitoreo, las concentraciones de PM_{10} se mantuvieron dentro del límite permisible establecido por la Normativa Ecuatoriana (NECA); sin embargo, en varios días se superaron los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que representa un potencial riesgo para la salud humana. El análisis conjunto de los datos de tráfico y calidad del aire evidenció que no existe una correlación significativa entre el flujo vehicular y las concentraciones de $PM_{2.5}$, observándose una alta dispersión en los gráficos de correlación. Aunque se identificaron picos de circulación vehicular en horarios específicos, como a las 7:00h en la calle Simón Bolívar, estos no se tradujeron en incrementos consistentes ni estadísticamente representativos de las concentraciones de $PM_{2.5}$, registrándose un promedio diario de $15,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor considerado moderado y no crítico. Estos resultados sugieren que factores externos, como las condiciones meteorológicas, la dispersión atmosférica y la composición del parque automotor predominantemente vehículos livianos y medianos a gasolina, tienen una influencia significativa en la variabilidad de los contaminantes medidos.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que en futuras investigaciones se amplíe la selección de zonas de estudio, priorizando vías urbanas con mayor tránsito de vehículos pesados y transporte público,

como avenidas periféricas, corredores de buses o accesos principales a la ciudad. Este tipo de vías presenta emisiones más significativas debido al uso de motores diésel y mayores cargas vehiculares, lo que permitiría evaluar de manera más representativa el impacto real del tráfico sobre la calidad del aire. Dado que la zona analizada en este estudio se ubica en el centro histórico de Ibarra, donde la circulación de vehículos pesados es limitada, los resultados obtenidos podrían subestimar el efecto total del tráfico vehicular sobre la contaminación atmosférica. La inclusión de nuevas zonas permitiría además comparar distintos escenarios urbanos y fortalecer el análisis espacial de la contaminación.

- Es aconsejable complementar el uso de sensores de bajo costo con equipos de referencia o sensores de mayor precisión mediante campañas de calibración cruzada, con el fin de reducir la dispersión de los datos y mejorar la confiabilidad de los análisis. Esta estrategia permitiría obtener relaciones cuantitativas más sólidas entre el tráfico vehicular y los contaminantes atmosféricos. Adicionalmente, considerando el predominio de vehículos livianos a gasolina en la zona de estudio, se sugiere incorporar sensores específicos para la medición de contaminantes característicos de este tipo de combustión, como CO, NO₂, hidrocarburos no quemados y compuestos orgánicos volátiles. La inclusión de sensores electroquímicos o de ionización fotoeléctrica (PID) permitiría una mejor representación del impacto real del parque automotor a gasolina sobre la calidad del aire.
- Resulta conveniente realizar una evaluación técnica detallada del entorno antes de la instalación de las cámaras de reconocimiento automático de matrículas (ANPR), con el objetivo de identificar elementos visuales que puedan generar errores en el proceso de detección y clasificación vehicular. En el presente estudio, la presencia de formas

numéricas y señalización en el pavimento provocó confusiones en el algoritmo, afectando la lectura de placas y la identificación del color del vehículo. Así mismo, se sugiere utilizar cámaras con mayor resolución y optimizar los ángulos de captura, además de implementar algoritmos de clasificación más avanzados o procesos de validación manual, con el fin de mejorar la precisión en la identificación del tipo de vehículo y fortalecer el análisis de emisiones por categoría vehicular.

- Se sugiere la implementación de una estación meteorológica en futuras campañas de monitoreo, que permita registrar variables como velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa. Estas variables son fundamentales para interpretar correctamente la dispersión de los contaminantes atmosféricos y determinar si las concentraciones registradas provienen de fuentes locales o de aportes externos. La integración de información meteorológica permitiría explicar de mejor manera la baja correlación observada entre el flujo vehicular y la calidad del aire, mejorando la interpretación de los resultados y fortaleciendo el análisis causa efecto en estudios de contaminación atmosférica urbana.
- Es recomendable utilizar herramientas de procesamiento de datos, como Power BI, para la limpieza y depuración de datos obtenidos tanto del sensor de calidad de aire como la cámara ANPR. Esta herramienta fue de gran utilidad para la gestión de grandes datos, permitiendo así datos más precisos y poder representarlos de manera clara en gráficos que faciliten la interpretación de resultados.

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial PDOT 2024 - 2027», Ibarra, Ciudad blanca a la que siempre se vuelve. Accedido: 29 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibarra.gob.ec/site/download/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-pdot-2024-2027/>
- [2] «Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial PDOT 2024 - 2027», Ibarra, Ciudad blanca a la que siempre se vuelve. Accedido: 9 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibarra.gob.ec/site/download/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-pdot-2024-2027/>
- [3] Aparcamurcia, «La calidad del aire», Aparcamurcia. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aparcamurcia.com/la-calidad-del-aire/>
- [4] E. Aránguez *et al.*, «Contaminantes atmosféricos y su vigilancia», *Revista Española de Salud Pública*, vol. 73, n.º 2, pp. 123-132, mar. 1999.

- [5] «Contaminacion-ambiental-origen-clases-fuentes-y-efectos.pdf». Accedido: 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dsp.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2022/02/Contaminacion-ambiental-origen-clases-fuentes-y-efectos.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [6] S. Mazza, D. Aiello, A. Macario, y P. De Luca, «Vehicular Emission: Estimate of Air Pollutants to Guide Local Political Choices. A Case Study», *Environments*, vol. 7, n.º 5, p. 37, may 2020, doi: 10.3390/environments7050037.
- [7] «Vehicle emissions and efficiency». Accedido: 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/vehicle-emissions-and-efficiency-1>
- [8] maguadam1526, «Los autos, los principales contaminantes del planeta», ColorMag. Accedido: 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://maguadam.com/los-autos-los-principales-contaminantes-del-planeta/>
- [9] J. Téllez, A. Rodríguez, y Á. Fajardo, «Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental», *Rev. salud pública*, vol. 8, n.º 1, pp. 108-117, abr. 2006, doi: 10.1590/S0124-00642006000100010.
- [10] «BASANTES VACA CARMEN VIVIANA.pdf». Accedido: 2 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/7016/1/BASANTES%20VACA%20CARMEN%20VIVIANA.pdf>
- [11] «Emisiones Contaminantes - Hidrocarburos (HC) - e-auto.com.mx - El Sitio de los Mecánicos y Refaccionarios». Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.e-auto.com.mx/engew/index.php?view=article&id=7080>
- [12] C. F. Gaviria G, P. C. Benavides C, y C. A. Tangarife, «Contaminación por material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009)», *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 29, n.º 3, pp. 241-250, sep. 2011.
- [13] O. US EPA, «Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)». Accedido: 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- [14] «Contaminación atmosférica en Latinoamérica: oportunidad para abordar el cambio climático y la salud pública». Accedido: 26 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrdc.org/es/bio/amanda-maxwell/contaminacion-atmosferica-latinoamerica-oportunidad-abordar-cambio-climatico>
- [15] C. N. Hernández Cerda, A. Ávila Galarza, D. G. Cerda Alonso, C. N. Hernández Cerda, A. Ávila Galarza, y D. G. Cerda Alonso, «Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México», *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 57, n.º 1, jun. 2023, doi: 10.15359/rca.57-1.8.
- [16] «World Health Organization (WHO)». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es>
- [17] S. A. Pacsi Valdivia, «Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima Metropolitana», *Anales Científicos*, vol. 77, n.º 2, pp. 273-283, 2016.

- [18] G. Morantes y N. Pérez, «REVISIÓN DE INSTRUMENTOS NORMATIVOS DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SISTEMAS DE MONITOREO ATMOSFÉRICO: AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE», vol. 41, 2016.
- [19] E. K. M. Palacios, «La contaminación del aire, un problema de todos», *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 67, n.º 2, Art. n.º 2, abr. 2019, doi: 10.15446/revfacmed.v67n2.82160.
- [20] V. Díaz Suárez y C. Páez Pérez, «Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras», *Acta Nova*, vol. 3, n.º 2, pp. 308-322, jun. 2006.
- [21] W. G. Tucker, «An overview of PM2.5 sources and control strategies», *Fuel Processing Technology*, vol. 65-66, pp. 379-392, jun. 2000, doi: 10.1016/S0378-3820(99)00105-8.
- [22] «IJERPH | Free Full-Text | Toxicity Research of PM2.5 Compositions In Vitro». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1660-4601/14/3/232>
- [23] «Disparities in PM2.5 air pollution in the United States | Science». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aaz9353>
- [24] Q. Zhang *et al.*, «Drivers of improved PM2.5 air quality in China from 2013 to 2017», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, n.º 49, pp. 24463-24469, dic. 2019, doi: 10.1073/pnas.1907956116.
- [25] «Contaminación atmosférica en el municipio Regla: Aplicación del índice de calidad del aire (ICA). | Revista Cubana de Meteorología». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/308>
- [26] «Sistema prototipo para la estimación del comportamiento del índice de calidad del aire usando técnicas de aprendizaje computacional». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55042>
- [27] S. Cárdenas A., «Normas e índices de la calidad del aire: situación de la ciudad de Santiago», *Rev. chil. enferm. respir.*, pp. 191-6, 1991.
- [28] J. D. Burgos Tatés, «“Determinación de los niveles de contaminación a la atmósfera por emisiones de CO en el Distrito Metropolitano de Quito”», masterThesis, Ecuador : Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2023. Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/10654>
- [29] K. L. Arboleda Lozada y A. N. Neto Jiménez, «Modelos parametrizados de calidad de aire en base a sensores remotos en el Distrito Metropolitano de Quito entre los años 2016 al 2019», bachelorThesis, 2021. Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19929>
- [30] «AQI Basics | AirNow.gov». Accedido: 15 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics>
- [31] C. A. Lucas Jurado, «Evaluación del tiempo de finalización de flujo del tráfico interno de una red de centro de datos en crecimiento basado en SDN», masterThesis, 2023. Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26618>
- [32] S. J. Picoy Alvarado, «Análisis del flujo vehicular y el nivel de servicio en el jirón dos de mayo aledaño al centro de la Ciudad de Huánuco, 2021», *Universidad Nacional Hermilio Valdizán*, 2021, Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/6570>

- [33] V. Shvetsov y D. Helbing, «Macroscopic dynamics of multilane traffic», *Phys. Rev. E*, vol. 59, n.º 6, pp. 6328-6339, jun. 1999, doi: 10.1103/PhysRevE.59.6328.
- [34] R. M. Velasco y P. Saavedra, «Macroscopic Models in Traffic Flow», *Qual. Theory Dyn. Syst.*, vol. 7, n.º 1, pp. 237-252, ago. 2008, doi: 10.1007/s12346-008-0014-1.
- [35] K. Helati y B. G. Hutchinson, «MEJORA DE LAS ESTIMACIONES SOBRE LAS EMISIONES DE VEHICULOS MEDIANTE MEJORES ACCESOS PARA EL FLUJO DEL TRAFICO», *XII CONGRESO MUNDIAL IRF, MADRID 1993. TOMO I*, may 1993, Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1004425>
- [36] J. A. Castán, S. Ibarra, J. Laria, J. Guzmán, y E. Castán, «Control de tráfico basado en agentes inteligentes», *Polibits*, vol. 50, pp. 61-68, jul. 2014, doi: 10.17562/PB-50-9.
- [37] V. Muñoz Yi, J. R. Caballero Farfán, y L. E. Cavas Marín, «Análisis comparativo de un modelo teórico de mediciones sonoras y el software SOUNDPLAN Ver. 6.2 aplicado al tráfico vehicular», *Revista de Ingeniería*, n.º 23, pp. 58-67, may 2006.
- [38] «idUS - Optimización del flujo del tráfico mediante un modelo matemático». Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/146887>
- [39] «Análisis del flujo de tráfico mediante el reconocimiento de imágenes.» Accedido: 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gredos.usal.es/handle/10366/150014>
- [40] Á. Duran y M. Alejandra, «Análisis, diseño e implementación de un sistema de control de ingreso de vehículos basado en visión artificial y reconocimiento de placas en el parqueadero de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca».
- [41] M. A. Awaimri, S. Fageeri, A. Moyaid, y A. ALhasanat, «Vehicles Number Plate Recognition Systems A Systematic Review», en *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, Khartoum, Sudan: IEEE, feb. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICCCEEE49695.2021.9429605.
- [42] C. S. Oto Narváez, «Implementación de estaciones de calidad de aire de bajo costo para Ibarra», bachelorThesis, Universidad Tecnica del Norte, Ibarra. Ecuador, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16710>
- [43] AirGradient, «Outdoor Air Quality Monitor», AirGradient. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.airgradient.com/outdoor/>
- [44] «ITC413-PW4D Series - Dahua Latin America», Dahua Technology. Accedido: 29 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dahuasecurity.com/la/products/All-Products/Intelligent-Traffic/Productos-Aparcamiento-Inteligente/Access-ANPR-Cameras/ITC413-PW4D-Series>
- [45] A. B. Martínez, E. A. G. Lista, y L. C. G. Flórez, «Técnicas de modelado de procesos de ETL: una revisión de alternativas y su aplicación en un proyecto de desarrollo de una solución de BI», vol. 18, n.º 1.