

Informe final pasantía

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS FUENTES MÓVILES SOBRE LA CALIDAD
DEL AIRE Y SUS EXTERNALIDADES EN LA CIUDAD DE TUNJA.

MARIA JOSÉ GUERRERO LAURENS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
DIVISIÓN DE ARQUITECTURAS E INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÁ
2025

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS FUENTES MÓVILES SOBRE LA CALIDAD
DEL AIRE Y SUS EXTERNALIDADES EN LA CIUDAD DE TUNJA.

MARIA JOSÉ GUERRERO LAURENS

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE PASANTÍA PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

DIRECTORA

ELISA MARIA AVELLANEDA DIAZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
DIVISIÓN DE ARQUITECTURAS E INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÁ
2025

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la sabiduría, paciencia y determinación necesarias para alcanzar esta meta. A mis padres, quienes con su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio han sido el pilar fundamental en mi formación. Su ejemplo de esfuerzo y perseverancia ha sido mi mayor inspiración para continuar adelante. También me dedico este logro a mí misma, por nunca rendirme ante los desafíos, por la disciplina y entrega que puse en cada etapa de este proceso y por la confianza en que cada esfuerzo valdría la pena. A Dios, a mi familia y a mí misma, con gratitud y emoción, dedico este trabajo que marca el inicio de nuevas oportunidades y aprendizajes.

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza y la claridad para afrontar los retos y culminar con éxito esta etapa.

A mis padres, Glendys Mercedes Laurens y Fernando Rafael Guerrero, quienes nunca se rindieron y siempre me sacaron adelante ante cualquier dificultad. Su esfuerzo, dedicación y amor incondicional han sido fundamentales en mi formación y en cada uno de mis logros. Gracias por ser mi mayor inspiración y mi pilar en todo momento.

A mis profesores, quienes con su conocimiento y experiencia me guiaron a lo largo de mi formación académica. Su orientación me permitió desarrollar una visión más amplia y crítica sobre mi campo de estudio, impulsándome a dar lo mejor de mí.

A mi tutora y a los profesionales de la Secretaría de Movilidad y Vida Territorial de Tunja, por brindarme la oportunidad de ser parte de este proceso, por su acompañamiento y por compartir su experiencia, lo que enriqueció significativamente mi aprendizaje.

Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros, quienes con su apoyo y palabras de aliento hicieron que este camino fuera más llevadero, y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	7
RESUMEN	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. MARCO REFERENCIAL	16
3.1 Marco contextual	16
3.1.1 Contexto de la organización:	16
3.1.2 Localización.....	17
3.1.3 Areas De Desempeño	17
3.2 Marco teórico.....	18
3.3 Marco Conceptual.....	19
3.4 Marco legal	20
4. DESARROLLO DE LA PASANTÍA.....	22
4.1 Metodología.....	22
5. RESULTADOS OBTENIDOS	27
5.1 Inventario de emisiones	27
5.2 Mapas de dispersión de contaminantes:	35
5.3 Externalidades del parque automotor	42
5.4 Controles Ambientales para Fuentes Móviles en Tunja	44
7. CONCLUSIONES.....	48
8. RECOMENDACIONES	49
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
10. ANEXOS	55

TABLAS

Tabla 1 Clasificación normas EURO para Vehículos a gasolina y Gas.....	22
Tabla 2 Clasificación normas EURO para Vehículos Diesel.....	23
Tabla 3 variables de temperaturas y humedad relativa para el años 2021	23
Tabla 4 resultados promedios de concentración de contaminantes	25
Tabla 5 Niveles permisibles de contaminantes según la OMS y Res 225472017	25
Tabla 6 Clasificación de vehículos a gasolina su según clase	27
Tabla 7 Clasificación de vehículos a gasolina según normas Euro	29
Tabla 8 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según clase.....	30
Tabla 9 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según normas Euro	32
Tabla 10 Cantidad de emisiones contaminantes para el 2021	34

MAPAS

Mapa 1 Dispersión de PM _{2.5}	36
Mapa 2 Dispersión de PM ₁₀	37
Mapa 3 Dispersión de CO	38
Mapa 4 Dispersión de NO	39
Mapa 5 Dispersión de NO ₂	40
Mapa 6 Dispersión de O ₃	41

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Organigrama de la Alcaldía Municipal de Tunja.....	16
Ilustración 2 Ubicación de la secretaria de movilidad y vida territorial de Tunja...	17
Ilustración 3 Localización de las estaciones.....	24
Ilustración 4 Evidencia fotográfica de reuniones presenciales.....	27

GRAFICOS

Gráfico 1 clasificación vehículos a gasolina	28
Gráfico 2 Clasificación de vehículos a gasolina según normas Euro.....	30
Gráfico 3 clasificación vehículos a Diesel y ACPM	31
Gráfico 4 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según normas Euro.....	33
Gráfico 5 Emisiones contaminantes en toneladas para el año 2021 en la ciudad de Tunja..	34

RESUMEN

El presente documento expone el trabajo realizado en el marco de la pasantía desarrollada en la Secretaría de Movilidad y Vida Territorial de la ciudad de Tunja, donde se brindó apoyo en la formulación del eje temático de gestión ambiental del Observatorio de Movilidad. Durante la pasantía, se llevaron a cabo diversas actividades enfocadas en el análisis de la calidad del aire en la ciudad. Para ello, se realizó el procesamiento y análisis de datos provenientes de estaciones de monitoreo, así como la elaboración de mapas de dispersión de contaminantes utilizando herramientas de modelación espacial. Adicionalmente, se determinó la metodología para el cálculo de las externalidades ambientales generadas por el parque automotor, estableciendo una fórmula que permite cuantificar los costos asociados a la contaminación vehicular en términos de salud pública y afectaciones ambientales.

Como parte del proceso, también se llevó a cabo un estudio detallado de la normatividad vigente, tanto a nivel nacional como internacional, relacionada con la calidad del aire y su vínculo con las fuentes móviles. Esto permitió contrastar las regulaciones y estándares aplicables en Colombia con las recomendaciones de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y normativas de referencia en otros países.

Este proceso permitió aportar insumos técnicos y analíticos fundamentales para el desarrollo del Observatorio de Movilidad, facilitando la integración de criterios ambientales en la planificación del transporte urbano y contribuyendo a la generación de información clave para la toma de decisiones en materia de movilidad sostenible y calidad del aire en la ciudad de Tunja.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la planificación de la movilidad urbana ha evolucionado hacia enfoques más integrales, donde el monitoreo y la evaluación de políticas de transporte juegan un papel clave en la gestión del entorno urbano. En este contexto, los observatorios de movilidad han cobrado relevancia como herramientas fundamentales para la recopilación, análisis y visualización de datos sobre patrones de tráfico y dinámicas de movilidad, permitiendo una toma de decisiones informada y en tiempo real. Ejemplos como el observatorio de movilidad en Pereira, Colombia, que emplea tecnologías de visión por computador y sistemas de información geográfica (SIG), o el observatorio académico en Cuenca, Ecuador, enfocado en movilidad sostenible y seguridad vial, destacan el potencial de estos sistemas para facilitar la planificación urbana basada en evidencia (Agudo Juela et al., 2021).

Paralelamente, la creciente preocupación por la calidad del aire en entornos urbanos ha llevado a una estrecha vinculación entre movilidad y gestión ambiental. El tráfico vehicular es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, con emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM10) que pueden ser modeladas espacialmente mediante SIG y métodos de interpolación geoestadística para identificar concentraciones y fuentes emisoras (Londoño et al., 2011). Estudios en Bogotá han evidenciado discrepancias entre los inventarios de emisiones y las mediciones ambientales reales, lo que resalta la necesidad de mejorar los factores de emisión y la precisión de las evaluaciones (Quiñones Cantor, 2012).

El impacto de las emisiones vehiculares va más allá de la contaminación del aire, afectando la salud pública y la dinámica urbana. Investigaciones en Pereira-Dosquebradas han demostrado la relación entre el incremento del flujo vehicular, la contaminación acústica y el deterioro en la salud respiratoria de la población, lo que a su vez genera costos elevados en el sistema de salud (Morales-Pinzón & Arias Mendoza, 2013). De igual forma, en el Área Metropolitana de Bucaramanga, se ha identificado que las externalidades del transporte, como la construcción de infraestructura vial, influyen en la economía local y la percepción de seguridad de los ciudadanos (Rueda Gómez & González Afanador, 2011).

La mitigación de estas externalidades ha impulsado la discusión sobre estrategias de intervención, incluyendo medidas regulatorias y económicas para reducir los impactos ambientales del transporte. A nivel internacional, se han implementado impuestos a las emisiones y normativas más estrictas, cuya efectividad depende de la identificación precisa de las fuentes de contaminación y la colaboración entre el gobierno, la academia y el sector privado (Gutiérrez Andrade et al., 2016). Casos en Estados Unidos y Argentina han demostrado que una combinación de regulaciones y medidas económicas adaptadas a cada

contexto puede ser una solución efectiva para disminuir la contaminación generada por fuentes móviles.

En este marco, la integración de observatorios de movilidad con sistemas de monitoreo de calidad del aire representa una estrategia clave para avanzar hacia ciudades más sostenibles. Estos instrumentos permiten no solo la identificación de patrones de tráfico y emisiones, sino también la evaluación del impacto de políticas públicas y el desarrollo de estrategias para mitigar las externalidades del transporte. La combinación de modelos espaciales, evaluación económica y políticas basadas en datos contribuirá a la construcción de un entorno urbano más saludable y eficiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Apoyar en la evaluación del impacto de las fuentes móviles sobre la calidad del aire y sus externalidades en la ciudad de Tunja, para integrarlo en el componente de gestión ambiental del observatorio de movilidad.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar las emisiones contaminantes generadas por las fuentes móviles en Tunja, basándose en el tipo de combustible y el tipo de motor de acuerdo con la información proporcionada por la secretaria de movilidad de la ciudad.
- Elaborar un mapa georreferenciado de los puntos críticos de contaminación del aire causados por fuentes móviles.
- Identificar las externalidades ambientales, económicas y sociales generadas por el parque automotor en la ciudad.

3. MARCO REFERENCIAL

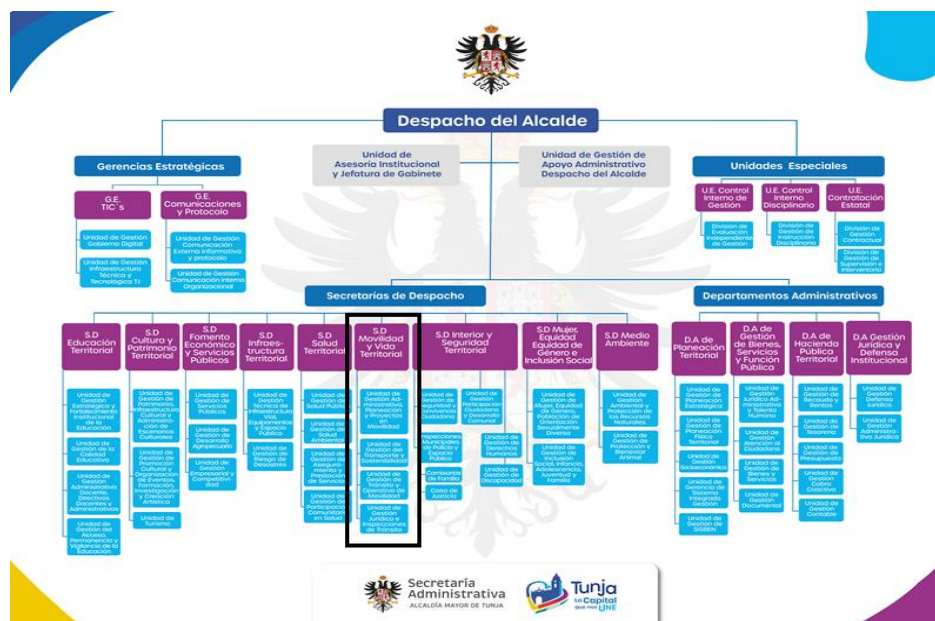
3.1 Marco contextual:

3.1.1 Contexto de la organización:

La Secretaría de Movilidad y Vida Territorial de Tunja es una dependencia de la alcaldía que supervisa y regula el transporte público y privado en la ciudad de Tunja, en el departamento de Boyacá. El propósito principal de la Secretaría de Movilidad y Vida Territorial es realizar la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, planes, programas y proyectos en materia de tránsito y transporte, orientadas a mejorar la movilidad en condiciones de seguridad, comodidad, sostenibilidad y accesibilidad. Su misión es promover un sistema de transporte seguro, eficiente y sostenible para los residentes de Tunja y sus visitantes.

La Secretaría de Movilidad de Tunja también emite licencias de conducción, lleva a cabo el registro de vehículos, exámenes técnicos, gestiona el transporte público y coordina otras actividades relacionadas con la movilidad urbana con otras entidades gubernamentales y organizaciones locales. El objetivo de la dependencia es el de contribuir al desarrollo integral y sostenible de la ciudad mejorando la calidad de vida de sus habitantes mediante un sistema de transporte seguro, accesible y eficiente.

Ilustración 1 Organigrama de la Alcaldía Municipal de Tunja



Fuente: Alcaldía de Tunja

3.1.2 Localización

La Secretaría de Movilidad y Vida Territorial está ubicada en la ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá. Su ubicación exacta corresponde a las coordenadas 5.554103, -73.345300, y su dirección es Calle 48 con Carrera 1 - 35E, Manzana 1, Edificio Lirio Real 2.

Ilustración 2 Ubicación de la secretaria de movilidad y vida territorial de Tunja



Fuente: Google Earth

3.1.3 Áreas De Desempeño

La práctica se llevó a cabo en el área técnica y administrativa de la Secretaría de Movilidad y Vida de Tunja donde se realizaron actividades relacionadas con la planeación de un observatorio de movilidad enfocados en ejes temáticos como el tránsito, transporte, seguridad vial, infraestructura, medio ambiente y la normatividad de la ciudad de Tunja.

El área técnica y administrativa de la Secretaría de Movilidad y Vida de Tunja trabaja en la planificación y gestión ambiental de la movilidad urbana. Esto incluye la formulación e implementación de estrategias para reducir el impacto ambiental del tránsito y el transporte en la ciudad. Dentro de sus responsabilidades, se encuentra el monitoreo de la calidad del aire, la promoción de alternativas de movilidad sostenible, la regulación de emisiones contaminantes y la integración de criterios ambientales en la planificación vial. Además, se desarrollaron proyectos orientados a mitigar la contaminación generada por fuentes móviles y a fomentar el uso de energías limpias en el transporte. La Secretaría de Movilidad colabora

con otras entidades gubernamentales, organizaciones locales y la comunidad para fortalecer la conciencia ambiental y mejorar la sostenibilidad del sistema de movilidad en Tunja.

3.2 Marco teórico

El desarrollo de un observatorio de movilidad para la ciudad de Tunja debe enfocarse particularmente en la calidad del aire, dado que el tráfico vehicular es uno de los principales generadores de emisiones contaminantes en entornos urbanos. La literatura destaca la importancia de implementar estrategias de monitoreo integradas, como el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y la modelación de datos de calidad del aire para evaluar en tiempo real la variabilidad de contaminantes atmosféricos en zonas críticas (Londoño-Ciro et al., 2017).

El monitoreo adecuado de la calidad del aire implica no solo registrar las concentraciones de contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), sino también determinar cómo estos se distribuyen espacial y temporalmente en función del flujo vehicular. En ciudades como Medellín, se ha demostrado que las zonas de alta densidad de tráfico son puntos críticos de acumulación de PM₁₀, lo cual afecta la salud pública en áreas urbanas densamente pobladas (Pereira et al., 2023).

En estudios previos, se ha evidenciado que las políticas de movilidad que fomentan el uso de transporte alternativo y la regulación de las emisiones vehiculares tienen un impacto significativo en la mejora de la calidad del aire. (Goel y Guttikunda;2017) destacan que la implementación de zonas de bajas emisiones y el fomento de transporte eléctrico pueden reducir las concentraciones de contaminantes en un 20-30% en áreas de alta congestión. Por otro lado, en Bogotá se ha documentado cómo la sobreestimación de factores de emisión puede llevar a políticas ineficaces si no se ajustan correctamente las metodologías de estimación de inventarios de emisiones (Quiñones Cantor et al., 2008).

La estimación precisa de emisiones es esencial para planificar acciones de mitigación efectivas; Según (Londoño et al.2011), el uso de modelos como el IVE, ajustados a las características del parque automotor local, permite obtener resultados más confiables y desarrollar estrategias adecuadas para reducir los niveles de contaminación en áreas urbanas. Este tipo de abordaje facilita también la identificación de puntos de muestreo ideales para redes de monitoreo de calidad del aire.

Un observatorio de movilidad con enfoque en calidad del aire debe integrar datos en tiempo real para evaluar el impacto de las intervenciones de tráfico, permitiendo así visualizar la evolución de los contaminantes y la efectividad de las políticas implementadas. Además, se debe contemplar la influencia de factores como la proximidad a fuentes industriales y la

presencia de vegetación urbana, que pueden modificar la distribución de contaminantes (Borge et al., 2018).

Finalmente, el análisis de las externalidades es un aspecto clave para evaluar el costo-beneficio de las políticas de movilidad. Según Gutiérrez Andrade (2018), las externalidades negativas, como el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, representan un costo oculto para la sociedad. La reducción de estos costos implica no solo la implementación de tecnologías más limpias, sino también un rediseño urbano que favorezca modos de transporte sostenibles y disminuya la exposición de la población a altos niveles de contaminación.

En este sentido, la inclusión de un ingeniero ambiental en el equipo del observatorio es esencial, ya que posee las competencias necesarias para interpretar datos ambientales y vehiculares, aplicar metodologías de estimación de emisiones y proponer soluciones sostenibles que mitiguen el impacto de la contaminación. La experiencia del ingeniero ambiental en el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y en la implementación de redes de monitoreo asegura una recolección precisa de datos y un análisis efectivo, lo que resulta en decisiones informadas y fundamentadas (Londoño-Ciro et al., 2017).

En conclusión, un observatorio de movilidad para Tunja debe priorizar el monitoreo continuo de la calidad del aire, empleando modelos que permitan la identificación de puntos críticos y el análisis de la efectividad de las intervenciones en tiempo real. Mediante un enfoque multidisciplinario, que integre ingenieros ambientales, permitirá el desarrollo de políticas de movilidad basadas en la evidencia y ajustadas a las características del entorno urbano. Así, se garantizan decisiones fundamentadas en criterios científicos y técnicos sólidos, la identificación y gestión de las externalidades ambientales, como el ruido y la contaminación del aire, se convierten en parte integral del proceso de planificación, contribuyendo al bienestar de la población y a la sostenibilidad del entorno urbano.

3.3 Marco Conceptual:

Movilidad urbana: Hace referencia al conjunto de desplazamientos que realizan las personas y bienes en un entorno urbano, incluyendo el uso de varios modos de transporte como vehículos privados, transporte público, bicicletas y desplazamientos a pie. La movilidad urbana tiene una relación directa con la accesibilidad, la eficiencia del transporte y su impacto en la calidad de vida de la población (Jaramillo Villegas et al., 2020).

Observatorio de movilidad: Es una plataforma dedicada a recopilar, analizar y visualizar información sobre dinámicas de tráfico y movilidad. Su meta es proporcionar datos en tiempo real para mejorar la toma de decisiones y la planificación urbana. Ejemplos de su

implementación incluyen el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y visión por computadora para monitorear el flujo vehicular y la congestión (Agudo Juela et al., 2021).

Calidad del aire: Se define como la condición del aire según la concentración de contaminantes presentes en la atmósfera. La calidad del aire en entornos urbanos se ve fuertemente influenciada por las emisiones de fuentes móviles, como vehículos particulares y transporte público, que generan contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM10) (Londoño et al., 2011).

Emisiones vehiculares: Son los contaminantes atmosféricos producidos por la combustión de combustibles fósiles en automóviles, motocicletas, autobuses y camiones. Estas emisiones comprenden gases y partículas que afectan la calidad del aire y la salud humana. La caracterización y modelación de estas emisiones a través de métodos de interpolación geoestadística permiten evaluar su impacto y diseñar estrategias de reducción (Quiñones Cantor, 2012).

Externalidades del transporte: Son los efectos indirectos del sistema de transporte sobre la sociedad y el medio ambiente, que pueden ser negativos, como la contaminación del aire y el ruido, o positivos, como el acceso a oportunidades económicas. Estudios han demostrado que el aumento del flujo vehicular genera costos asociados a la salud pública y el bienestar social (Morales-Pinzón & Arias Mendoza, 2013).

Modelos espaciales de contaminación: Herramientas analíticas que se utilizan para estimar la distribución y concentración de contaminantes en áreas urbanas. Estos modelos, que se basan en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de interpolación, permiten identificar las zonas críticas de contaminación y optimizar la ubicación de las estaciones de monitoreo ambiental (Londoño-Ciro et al., 2017).

Instrumentos económicos y regulatorios: Estrategias implementadas para reducir los impactos ambientales del transporte. Incluyen impuestos sobre las emisiones, restricciones de circulación, incentivos para la movilidad sostenible y normativas ambientales más estrictas. La efectividad de estas medidas depende de la adecuada identificación de las fuentes de contaminación y de la cooperación entre los sectores público y privado (Gutiérrez Andrade et al., 2016).

3.4 Marco legal

A continuación se mencionan las normatividades tanto nacionales como internacionales que se deben tener en cuenta cuando se habla de calidad del aire relacionada con fuentes móviles.

3.4.1 Normativa Internacional

A nivel global, existen estándares internacionales que buscan armonizar la regulación de emisiones y que pueden servir como referencia para fortalecer las regulaciones locales:

Clean Air Act (Acta de Aire Limpio) - EPA: En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) regula las emisiones de fuentes móviles a través de la Clean Air Act. Esta ley permite a la EPA establecer los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS), que incluyen límites para contaminantes como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y material particulado. La regulación establece objetivos de calidad del aire en todos los estados y abarca tanto vehículos de carretera como equipos de fuera de carretera, con controles específicos para motores en diversas categorías (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

Normativa de Emisiones de la Unión Europea: Los estándares Euro I, II, III, IV, V y VI regulan las emisiones de vehículos en la Unión Europea. Estos límites se han endurecido progresivamente para garantizar que las tecnologías de reducción de emisiones, como los sistemas de postratamiento de gases de escape, se apliquen en toda la flota vehicular. Aunque estos estándares no son obligatorios en Colombia, son una referencia para la mejora continua de los marcos locales (European Commission, 2021).

3.4.2 Normativa Nacional en Colombia

Colombia cuenta con un conjunto de regulaciones que controlan las emisiones de fuentes móviles terrestres (vehículos de pasajeros, transporte de carga, motocicletas, etc.), enmarcadas dentro del Decreto 1076 de 2015 y otras resoluciones más recientes:

Resolución 910 de 2008: Esta regulación establece los límites máximos de emisión para vehículos automotores terrestres en circulación y define los parámetros de verificación de emisiones para garantizar el cumplimiento ambiental. En línea con el Decreto 948 de 1995, esta resolución promueve la adopción de medidas correctivas y preventivas en el mantenimiento de vehículos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2008).

Resolución 0762 de 2022: Regula las emisiones de contaminantes atmosféricos de los vehículos automotores terrestres, estableciendo parámetros más rigurosos que incorporan tecnologías avanzadas de reducción de emisiones, como catalizadores y filtros de partículas. La normativa también contempla directrices para la transición hacia energéticos de bajas emisiones y alternativas más sostenibles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Ley 1972 de 2019: Este instrumento jurídico prioriza la salud pública al establecer un marco de medidas para la reducción de las emisiones contaminantes. Promueve la integración de

tecnologías más limpias y fomenta la adopción de vehículos eléctricos e híbridos para disminuir la contaminación por fuentes móviles (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Resolución 2254 de 2017: del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia establece el Reglamento Técnico de Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica (RTCAC). Su propósito principal es actualizar los estándares de calidad del aire en el país, estableciendo límites de concentración para contaminantes criterio y lineamientos para su monitoreo y gestión (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

4. DESARROLLO DE LA PASANTÍA

4.1 Metodología

La pasantía se desarrolló en tres etapas principales, cada una integrada por diversas actividades específicas. A continuación, se presenta a detalle el paso a paso de cada actividad realizada.

➤ Cuantificación de las emisiones anuales de Tunja

Para llevar a cabo esta actividad, fue necesario aprender a utilizar la interfaz del software COPERT 5.8, diseñado para cuantificar las emisiones generadas por fuentes móviles. Para ello, se realizó la clasificación de los vehículos activos registrados en el parque automotor de Tunja según las normas EURO, considerando el modelo de cada vehículo de la siguiente manera.

Tabla 1 Clasificación normas EURO para Vehículos a gasolina y Gas

Norma Euro	Año de Fabricación
Euro 1	1992 - 1996
Euro 2	1997 - 2000
Euro 3	2001 - 2005
Euro 4	2006 - 2010
Euro 5	2011 - 2015
Euro 6	2016 en adelante

Fuente: Elaboración propia en base a las normas EURO

La normativa Euro establece límites progresivamente más estrictos a las emisiones contaminantes de los vehículos a gasolina y gas, con el objetivo de reducir su impacto ambiental. Desde Euro 1 hasta Euro 6, se han implementado regulaciones que restringen la

emisión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), impulsando mejoras en los sistemas de combustión y postratamiento de gases. Estas normas permiten clasificar los vehículos según su nivel de emisiones y facilitan el desarrollo de políticas para mejorar la calidad del aire y la movilidad sostenible.

Tabla 2 Clasificación normas EURO para Vehículos Diesel

Norma Euro	Año de Fabricación
Euro 1	1993 - 1996
Euro 2	1997 - 2000
Euro 3	2001 - 2005
Euro 4	2006 - 2010
Euro 5	2011 - 2015
Euro 6	2016 en adelante

Fuente: Elaboración propia en base a las normas EURO

La clasificación de los vehículos diésel según la normativa Euro establece límites progresivamente más estrictos a las emisiones contaminantes, con el objetivo de reducir el impacto ambiental del parque automotor. Desde Euro 1, hasta Euro 6, se han endurecido las restricciones sobre monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM), impulsando el desarrollo de tecnologías como filtros de partículas diésel (DPF) y sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR). Estas regulaciones permiten evaluar la eficiencia ambiental de los vehículos y apoyar políticas de movilidad sostenible y control de la calidad del aire.

Después de la clasificación, se descargaron los datos de temperaturas mínimas y máximas mensuales, así como la humedad relativa de la ciudad de Tunja, con la misma frecuencia, a partir de la base de datos del IDEAM. Se seleccionó el año 2021 para la modelación, ya que fue el único período sin datos faltantes. A continuación, se presentan los parámetros descargados.

Tabla 3 variables de temperaturas y humedad relativa para el años 2021

2021	Tem min	Tem Max	Hr (%)
Enero	6.5	21.4	57.0
Febrero	7.4	22.6	54.5
Marzo	8.8	19.4	67.5
Abril	9.5	18.8	60.5
Mayo	9.4	18.8	67.5
Junio	9.2	18.4	69.0
Julio	8.7	17.0	72.5

Agosto	8.7	18.0	70.0
Septiembre	7.2	18.4	67.5
Octubre	8.6	20.1	60.0
Noviembre	8.5	20.3	67.5
Diciembre	8.8	20.8	64.5

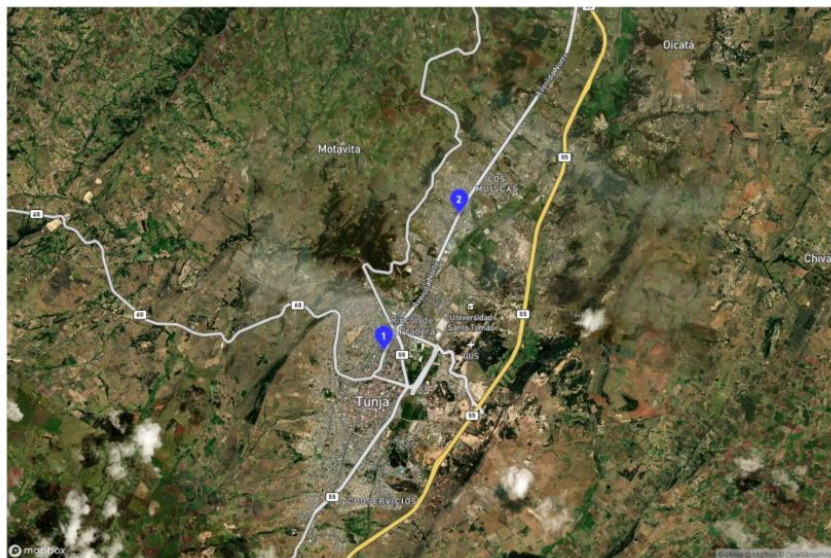
Fuente: propia con base a datos del IDEAM

Por último, se ingresaron los datos en el programa para calcular las toneladas emitidas de cada tipo de contaminante generado por las distintas fuentes móviles de la ciudad, los resultados se presentan en la siguiente sección.

➤ Elaboración de mapas de dispersión de contaminantes en la ciudad de Tunja

Para esta actividad, era fundamental contar con datos de al menos dos estaciones ubicadas en puntos estratégicos de la ciudad. Gracias a la gestión de la Secretaría de Movilidad, se logró instalar dos estaciones para medir la calidad del aire durante un mes; los puntos de ubicación de las estaciones fueron los siguientes.

Ilustración 3 Localización de las estaciones



Fuente: Informe Empresa Bettair®

La primera estación se ubicó en el barrio Maldonado, específicamente en la glorieta, un punto de alto flujo vehicular debido al ingreso y salida de vehículos de la ciudad. La segunda estación se estableció en el barrio Los Muiscas, otra zona con un tránsito vehicular constante dentro de la ciudad.

Tabla 4 resultados promedios de concentración de contaminantes

Estación	Sensor	Mínimo	Percentil 25	Media	Percentil 75	Máximo
Temperatura	BET00240017	9.37 °C	14.27 °C	17.13 °C	19.95 °C	31.15 °C
Temperatura	BET00230079	3.22 °C	14.06 °C	17.05 °C	19.99 °C	33.59 °C
HR	BET00240017	24.9 %	56.1 %	66.4 %	76.6 %	86.9 %
HR	BET00230079	22.7 %	57.1 %	68.2 %	79.2 %	89.6 %
Presión	BET00240017	715.8 hPa	736.6 hPa	737.9 hPa	738.8 hPa	752.6 hPa
Presión	BET00230079	-	-	-	-	-
NO	BET00240017	1 µg/m³	11.7 µg/m³	63.3 µg/m³	85 µg/m³	1060.5 µg/m³
NO	BET00230079	1 µg/m³	19.1 µg/m³	68.7 µg/m³	91 µg/m³	605.4 µg/m³
NO ₂	BET00240017	5.3 µg/m³	26.8 µg/m³	40.6 µg/m³	51.3 µg/m³	137.1 µg/m³
NO ₂	BET00230079	1 µg/m³	30.1 µg/m³	43.1 µg/m³	54.7 µg/m³	130.8 µg/m³
O ₃	BET00240017	1 µg/m³	1.4 µg/m³	13.4 µg/m³	22 µg/m³	65.1 µg/m³
O ₃	BET00230079	1 µg/m³	1 µg/m³	11.8 µg/m³	20.8 µg/m³	81.1 µg/m³
CO	BET00240017	0.157 mg/m³	0.349 mg/m³	0.908 mg/m³	1.198 mg/m³	9.299 mg/m³
CO	BET00230079	0.004 mg/m³	0.473 mg/m³	1.137 mg/m³	1.658 mg/m³	7.639 mg/m³
PM1	BET00240017	1 µg/m³	5 µg/m³	10 µg/m³	12 µg/m³	185 µg/m³
PM1	BET00230079	0 µg/m³	6 µg/m³	14 µg/m³	17 µg/m³	301 µg/m³
PM2.5	BET00240017	1 µg/m³	5 µg/m³	11 µg/m³	13 µg/m³	196 µg/m³
PM2.5	BET00230079	0 µg/m³	6 µg/m³	14 µg/m³	18 µg/m³	245 µg/m³
PM10	BET00240017	1 µg/m³	5 µg/m³	11 µg/m³	13 µg/m³	162 µg/m³
PM10	BET00230079	2 µg/m³	18 µg/m³	29 µg/m³	35 µg/m³	218 µg/m³

Fuente: Informe Empresa Bettair®

Con estos datos promedio, se reorganizó la información en un nuevo archivo de Excel, separando cada contaminante y cada estación de manera individual. Posteriormente, se realizó la modelación de los mapas de dispersión de los contaminantes utilizando el software ArcGIS. Finalmente, los resultados fueron comparados con los rangos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Resolución 2254 de 2017 de Colombia, tomando en cuenta los siguientes parámetros.

Tabla 5 Niveles permisibles de contaminantes según la OMS y Res 2254/2017

Contaminante	Promedio Temporal	Unidad	Nivel Permissible (OMS)	Promedio Temporal	Nivel Permissible (Resolución 2254/2017)	Unidad
PM10	Anual	µg/m3	15	Anual	50	µg/m3
	24 horas		45	24 horas	100	
PM2.5	Anual	µg/m3	5	Anual	25	µg/m3
	24 horas		15	24 horas	50	
O3	8 horas	µg/m3	100	8 horas	100	µg/m3
NO2	Anual	µg/m3	10	Anual	60	µg/m3

	24 horas	µg/m3	25	1 hora	200	µg/m3
SO2	24 horas	µg/m3	40	24 horas	50	µg/m3
	–	–	–	1 hora	100	µg/m3
CO	24 horas	mg/m3	4	8 horas	5000	µg/m3
	–	–	–	1 hora	35000	µg/m3

Fuente: Propia en base a datos de la OMS y Res 2254/2017

Además de la elaboración de los mapas, se brindó apoyo en la redacción de un informe sobre el comportamiento de la calidad del aire en la ciudad durante un Día sin Carro. Este análisis permitió comparar los niveles de contaminación entre un día común y el Día sin Carro, el informe completo se encuentra disponible en los Anexos.

➤ Evaluación de las externalidades del parque automotor de Tunja.

En el desarrollo de esta actividad, se contó con el apoyo de una ingeniera de la Secretaría de Medio Ambiente, quien brindó orientación en el cálculo de las externalidades asociadas a la contaminación del aire en la ciudad de Tunja. Para ello, se establecieron las fórmulas correspondientes y se obtuvieron resultados específicos aplicados a un caso de estudio. En este proceso, se emplearon funciones dosis-respuesta para evaluar los impactos en la salud de la población, así como funciones de costos en salud para estimar los gastos derivados de la exposición a contaminantes atmosféricos.

Como complemento a esta actividad, se llevó a cabo un análisis sobre los posibles controles ambientales que podrían implementarse en Tunja para mitigar y regular las emisiones generadas anualmente. Este estudio incluye la identificación de medidas tecnológicas y normativas aplicables a la ciudad, tomando en cuenta experiencias previas en otras localidades y las regulaciones ambientales vigentes.

Finalmente, para llevar a cabo todas las actividades mencionadas, fue necesaria la asistencia a múltiples reuniones con la Secretaría de Ambiente y la Secretaría de Movilidad. En estos encuentros, se presentaron avances y se recibieron sugerencias para mejorar la calidad de los informes. Además de las reuniones presenciales, se realizaron varios encuentros en modalidad híbrida a través de la plataforma Meet. A continuación, se comparten algunas fotografías de las reuniones presenciales en las que se participó.

Ilustración 4 Evidencia fotográfica de reuniones presenciales



5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Inventario de emisiones

Teniendo en cuenta los datos proporcionados sobre el parque automotor de la ciudad de Tunja, se identificaron los vehículos según su tipo de combustible: gasolina, diésel y ACPM. La distribución quedó de la siguiente manera.

Tabla 6 Clasificación de vehículos a gasolina su según clase

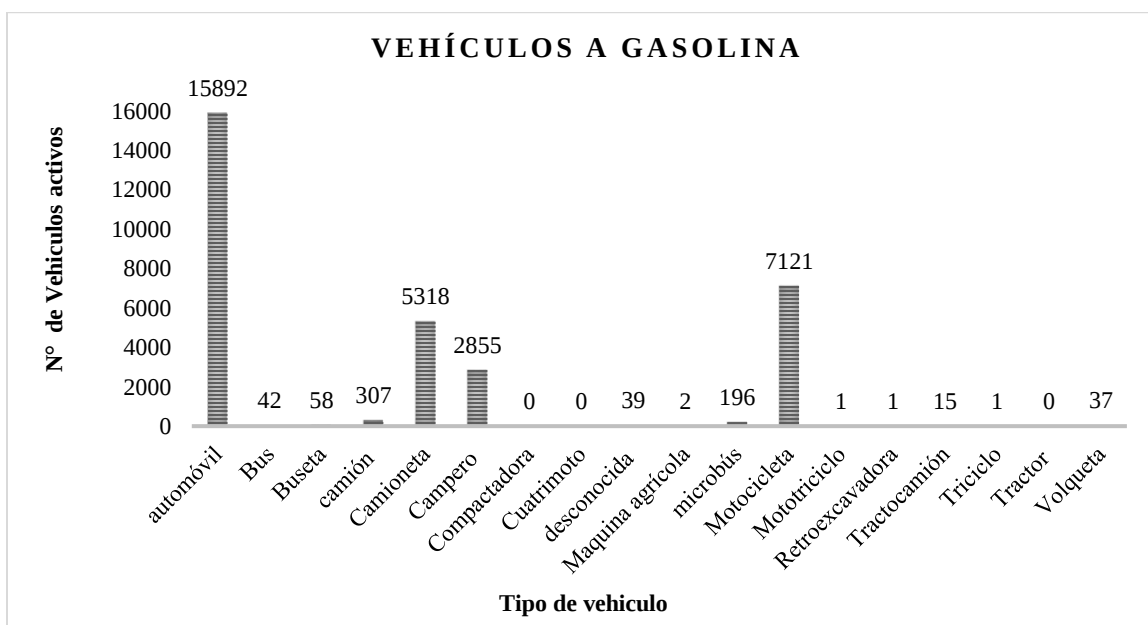
vehículos a gasolina	
Clase de vehículos	N° de vehículos
automóvil	15892
Bus	42
Buseta	58

camión	307
Camioneta	5318
Campero	2855
Compactadora	0
Cuatrimoto	0
desconocida	39
Maquina agrícola	2
microbús	196
Motocicleta	7121
Mototriciclo	1
Retroexcavadora	1
Tractocamión	15
Triciclo	1
Tractor	0
Volqueta	37
Total	31885

Fuente: Propia con datos del parque automotor de Tunja

A continuación, se presenta una representación gráfica de los resultados mediante un diagrama de barras, lo que facilita la comprensión y visualización de la distribución de los datos.

Gráfico 1 clasificación vehículos a gasolina



Fuente: propia

El parque automotor a gasolina en la ciudad de Tunja está compuesto por un total de 31.885 vehículos, distribuidos en diversas categorías según su tipo y función. Los automóviles representan la mayor proporción, con 15.892 unidades, lo que indica un uso predominante de este tipo de transporte para desplazamientos personales y familiares. Le siguen las camionetas (5.318 unidades) y los camperos (2.855 unidades), que suelen ser utilizados tanto para transporte particular como para actividades comerciales y recreativas. En cuanto a las motocicletas, se registran 7.121 unidades, lo que sugiere una alternativa de movilidad ágil y económica, especialmente en zonas urbanas. Otras categorías de transporte de pasajeros incluyen 196 microbuses, 58 busetas y 42 buses, evidenciando una menor proporción de vehículos de transporte público en comparación con los de uso particular.

En lo referente al transporte de carga y maquinaria pesada, el número de unidades es significativamente menor. Se encuentran 307 camiones, 15 tractocamiones y 37 volquetas, lo que indica una presencia limitada de vehículos de carga pesada en la ciudad. Además, se reportan 2 máquinas agrícolas, 1 retroexcavadora y 1 mototriciclo, reflejando un uso marginal de estos tipos de vehículos en la zona.

Es relevante mencionar que se identificaron 39 vehículos clasificados como desconocidos, lo que podría deberse a registros incompletos o a la falta de información en la base de datos. Con base en esto, se puede afirmar que el parque automotor a gasolina en Tunja está dominado por vehículos de uso particular, con una presencia significativa de motocicletas y una baja proporción de transporte público y carga pesada. A continuación, se presenta la clasificación de estos vehículos según las normas Euro.

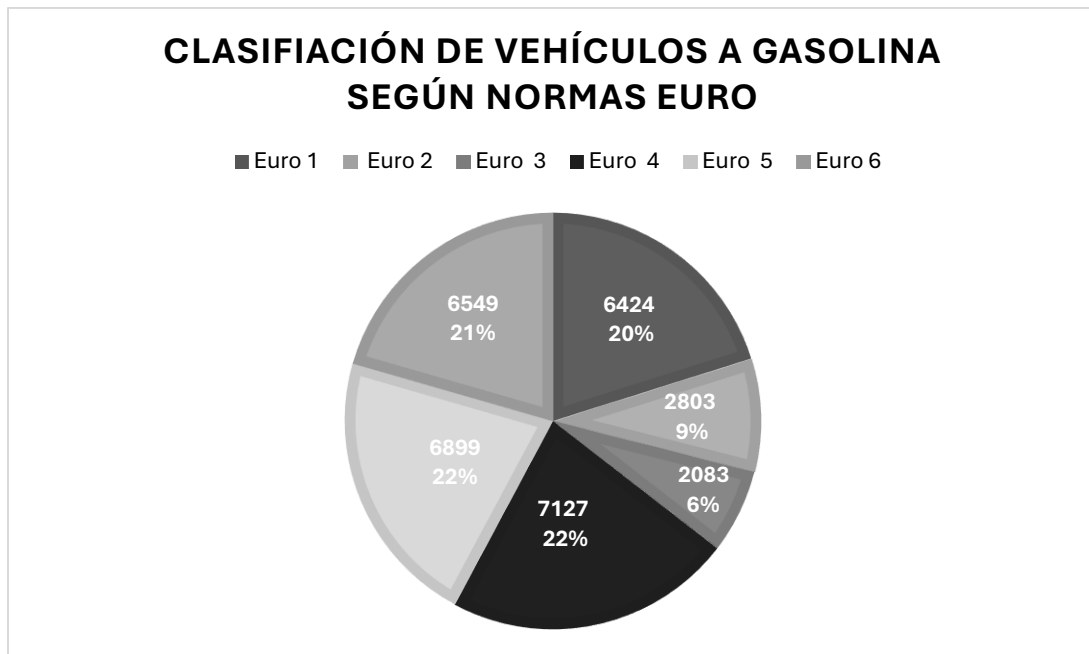
Tabla 7 Clasificación de vehículos a gasolina según normas Euro

EURO	Años de fabricación	No de vehículos
1	1992- 1996	6424
2	1997-2000	2803
3	2001-2005	2083
4	2006-2010	7127
5	2011- 2015	6899
6	2016 en adelante	6549
Total		31885

Fuente: Propia

Para la interpretación de estos datos, se tomaron los resultados y se representaron mediante un gráfico de pastel, lo que permitió una mejor comprensión y una visualización más clara de la distribución de los datos en términos de porcentajes.

Gráfico 2 Clasificación de vehículos a gasolina según normas Euro



Fuente: Propia

La categoría más representativa corresponde a los vehículos con normativa EURO 4 con 7.127 unidades, seguida por los vehículos EURO 5, con 6.899 unidades, y EURO 6, con 6.549 unidades. Estos vehículos, en general, cuentan con mayores estándares de eficiencia y menor impacto ambiental en comparación con modelos más antiguos. Por otro lado, aún persisten 6.424 vehículos EURO 1, los cuales generan mayores emisiones de contaminantes atmosféricos debido a la ausencia de tecnologías avanzadas de reducción de emisiones. De manera similar, los vehículos EURO 2 suman 2.803 unidades, y los EURO 3 alcanzan 2.083 unidades, lo que indica una presencia significativa de modelos con tecnologías menos eficientes en términos de control de emisiones.

Tabla 8 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según clase

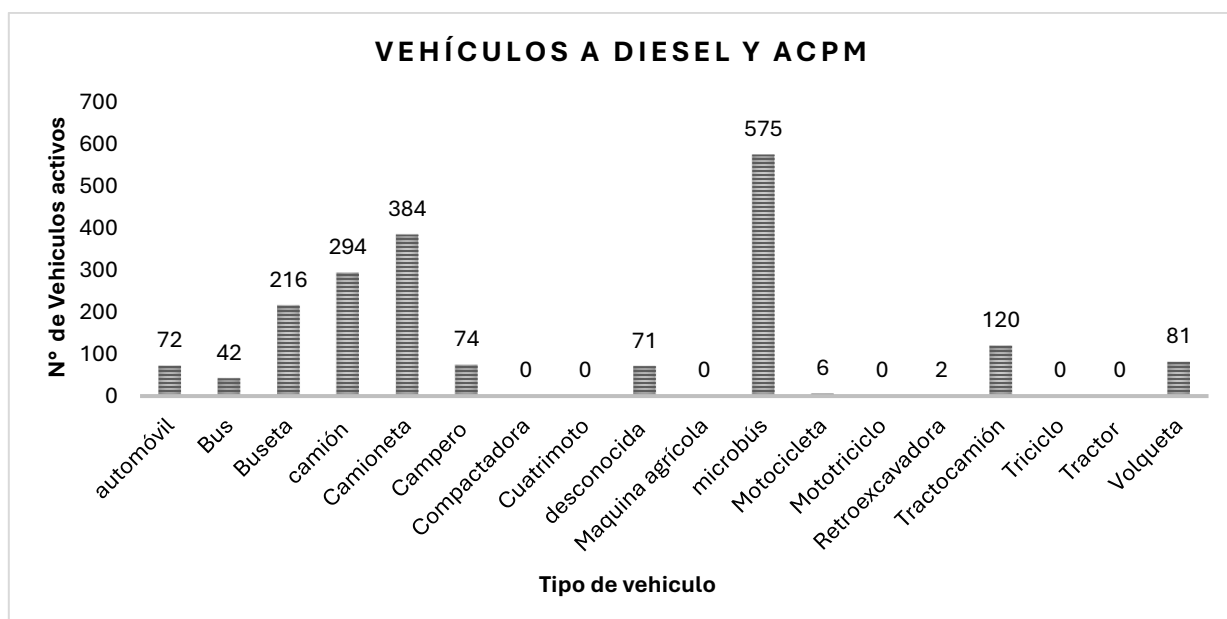
vehículos a Diesel y ACPM	
Clase de vehículos	No de vehículos
automóvil	72
Bus	42
Buseta	216
camión	294
Camioneta	384

Campero	74
Compactadora	0
Cuatrimoto	0
desconocida	71
Maquina agrícola	0
microbús	575
Motocicleta	6
Mototriciclo	0
Retroexcavadora	2
Tractocamión	120
Triciclo	0
Tractor	0
Volqueta	81
Total	1937

Fuente: Propia con datos del parque automotor de Tunja

Al igual que con los vehículos a gasolina, los datos fueron representados mediante un diagrama de barras para facilitar su comprensión.

Gráfico 3 clasificación vehículos a Diesel y ACPM



Fuente: Propia

El parque automotor que utiliza diésel y ACPM en la ciudad de Tunja está compuesto por un total de 1.937 vehículos, lo que representa una fracción menor en comparación con los vehículos a gasolina. Dentro de este parque automotor, los vehículos de transporte público y de pasajeros tienen una presencia destacada. Se registran 575 microbuses, 216 busetas y 42 buses, lo que indica una alta dependencia de combustibles diésel en el transporte colectivo de la ciudad. Asimismo, los automóviles diésel son poco comunes, con solo 72 unidades reportadas.

En cuanto a los vehículos de carga y maquinaria pesada, se encuentran 294 camiones, 120 tractocamiones, 81 volquetas y 2 retroexcavadoras, reflejando el uso de diésel en el sector de transporte de mercancías y construcción. Además, las camionetas diésel suman 384 unidades, mientras que los camperos alcanzan 74 unidades, representando una opción de transporte robusta en zonas rurales o de difícil acceso.

Es importante destacar que 71 vehículos aparecen en la categoría de "desconocidos", lo que podría deberse a registros incompletos en la base de datos. Aunque el número total de vehículos diésel en Tunja es bajo en comparación con los de gasolina, su impacto ambiental es considerable debido a sus altas emisiones contaminantes.

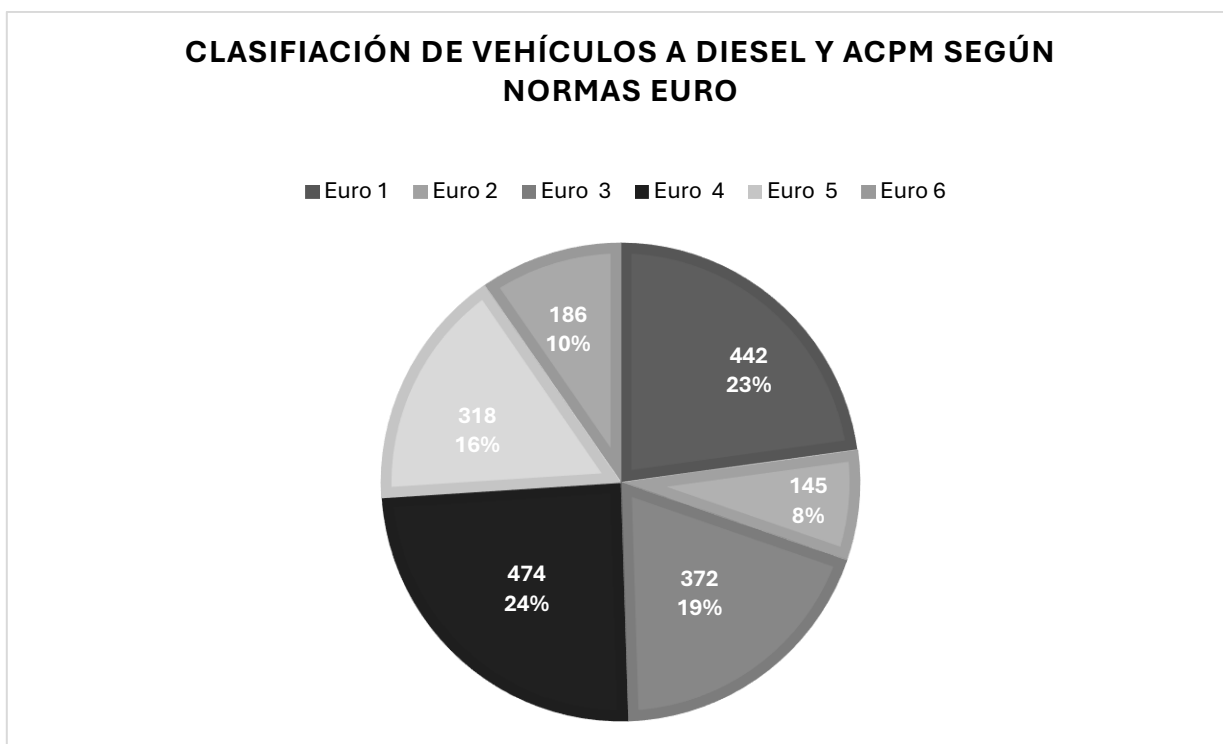
Tabla 9 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según normas Euro

EURO	Años de fabricación	N de vehículos
Euro 1	1993- 1996	442
Euro 2	1997-2000	145
Euro 3	2001-2005	372
Euro 4	2006-2010	474
Euro 5	2011- 2015	318
Euro 6	2016 en adelante	186
Total		1937

Fuente: Propia

A continuación, se presenta la representación de los resultados mediante un gráfico de pastel, lo que facilita la comprensión y proporciona una visualización más clara de la distribución de los datos.

Gráfico 4 Clasificación de vehículos a Diesel y ACPM según normas Euro



Fuente: Propia

La mayoría de los vehículos pertenecen a normativas EURO 4 (474 vehículos) y EURO 3 (372 vehículos), correspondientes a modelos fabricados entre 2001 y 2010, los cuales, aunque incorporan algunas mejoras tecnológicas, aún generan emisiones significativas de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NOx). Por otro lado, aún circulan 442 vehículos EURO 1 y 145 EURO 2, que corresponden a tecnologías más antiguas con mayores emisiones contaminantes. Mientras tanto, los vehículos más recientes y menos contaminantes, EURO 5 con 318 vehículos, y EURO 6 con 186 vehículos representan una proporción menor del total. La presencia de un alto porcentaje de vehículos con normativas antiguas resalta la necesidad de estrategias para modernizar la flota y reducir la contaminación del aire en la ciudad.

➤ Resultados de la modelación:

El modelo requería ciertos parámetros para el cálculo de las emisiones, incluyendo la velocidad mínima por tipo de vehículo y el kilometraje anual. Para este análisis, se estableció una velocidad mínima de 45 km/h y un recorrido anual de 30.000 km. Estas condiciones, junto con los parámetros de temperatura y humedad previamente mencionados, dieron como resultado las siguientes cantidades de emisiones en toneladas por contaminante.

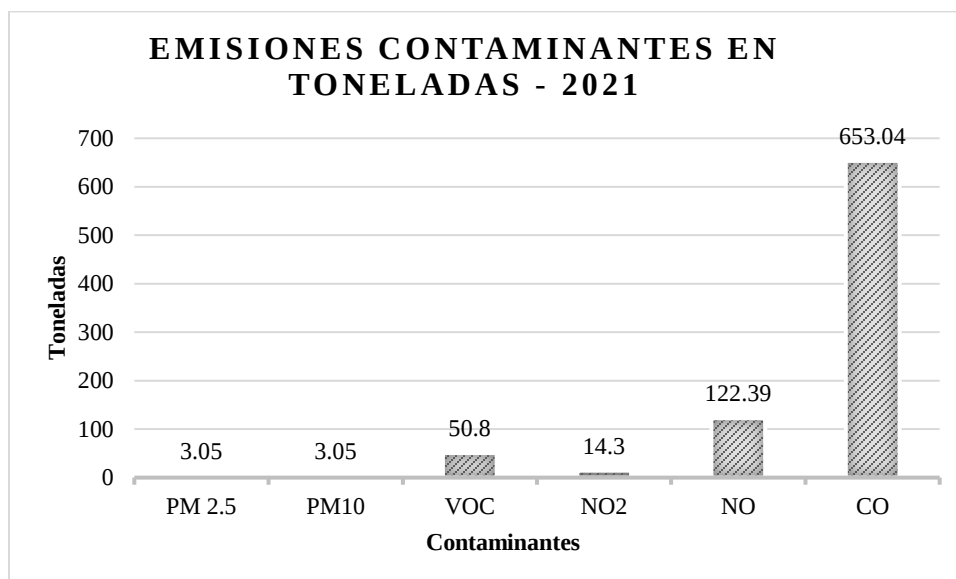
Tabla 10 Cantidad de emisiones contaminantes para el 2021

Contaminante	Emisiones en toneladas
PM 2.5	3.05
PM10	3.05
VOC	50.8
NO2	14.3
NO	122.39
CO	653.04

Fuente: Propia

El análisis de emisiones en la ciudad de Tunja revela una alta contribución de contaminantes atmosféricos provenientes del parque automotor. En términos de material particulado (PM), tanto PM2.5 como PM10 registran 3.05 toneladas anuales, afectando la calidad del aire y la salud respiratoria de la población. Los compuestos orgánicos volátiles (VOC) alcanzan 50.8 toneladas, mientras que los óxidos de nitrógeno presentan valores elevados, con 14.3 toneladas de NO₂ y 122.39 toneladas de NO, El monóxido de carbono (CO), asociado a la combustión incompleta de combustibles, alcanza 653.04 toneladas, lo que indica un impacto significativo en la calidad del aire urbano.

Gráfico 5 Emisiones contaminantes en toneladas para el año 2021 en la ciudad de Tunja.



Fuente: Propia

Con base en estos resultados, se puede concluir que, considerando su tamaño, Tunja genera una cantidad significativa de gases de efecto invernadero. Esto podría estar relacionado con el hecho de que gran parte de su parque automotor corresponde a modelos antiguos, con tecnologías menos eficientes en la reducción de emisiones. Además, el transporte público desempeña un papel clave en la contaminación, ya que es el sector con mayor circulación en la ciudad y la mayoría de sus vehículos pertenecen a las clasificaciones Euro 2, 3 y 4, que presentan estándares de emisiones menos estrictos en comparación con tecnologías más recientes. En este punto es importante aclarar que los datos que se usaron para la modelación son solo un ejemplo específico, por tal motivo estos resultados solo se pueden tomar como un referente mas no como un estándar fijo del comportamiento de la movilidad dentro de la ciudad.

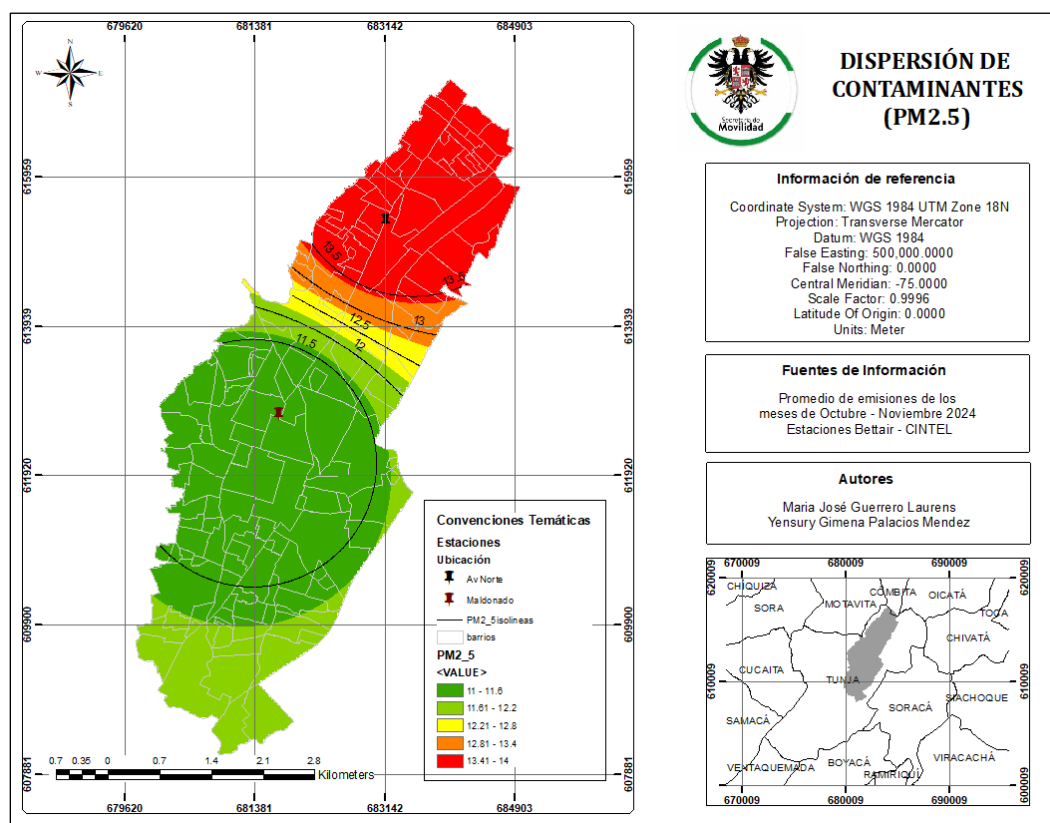
5.2 Mapas de dispersión de contaminantes:

➤ Mapa de dispersión de PM2.5:

Las partículas finas PM2.5 presentan una distribución desigual en la ciudad, mostrando concentraciones más altas en las zonas noreste y suroeste, según las áreas marcadas en tonos rojos en el mapa. Estos sectores reflejan una mayor presencia de contaminantes debido a factores como el tráfico vehicular intenso, las actividades industriales y condiciones atmosféricas que favorecen la acumulación de partículas en el aire. Por el contrario, las zonas centro-sur exhiben niveles más bajos de PM2.5, evidenciados en tonos verdes, lo cual puede asociarse a menor densidad vehicular, una mejor ventilación o la existencia de áreas verdes que contribuyen a la dispersión de contaminantes.

El PM2.5 es un contaminante atmosférico especialmente peligroso debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio y alcanzar los alvéolos pulmonares, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer pulmonar. Además, estas partículas pueden contener metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, lo que potencia su impacto en la salud pública.

Mapa 1 Dispersión de PM2.5



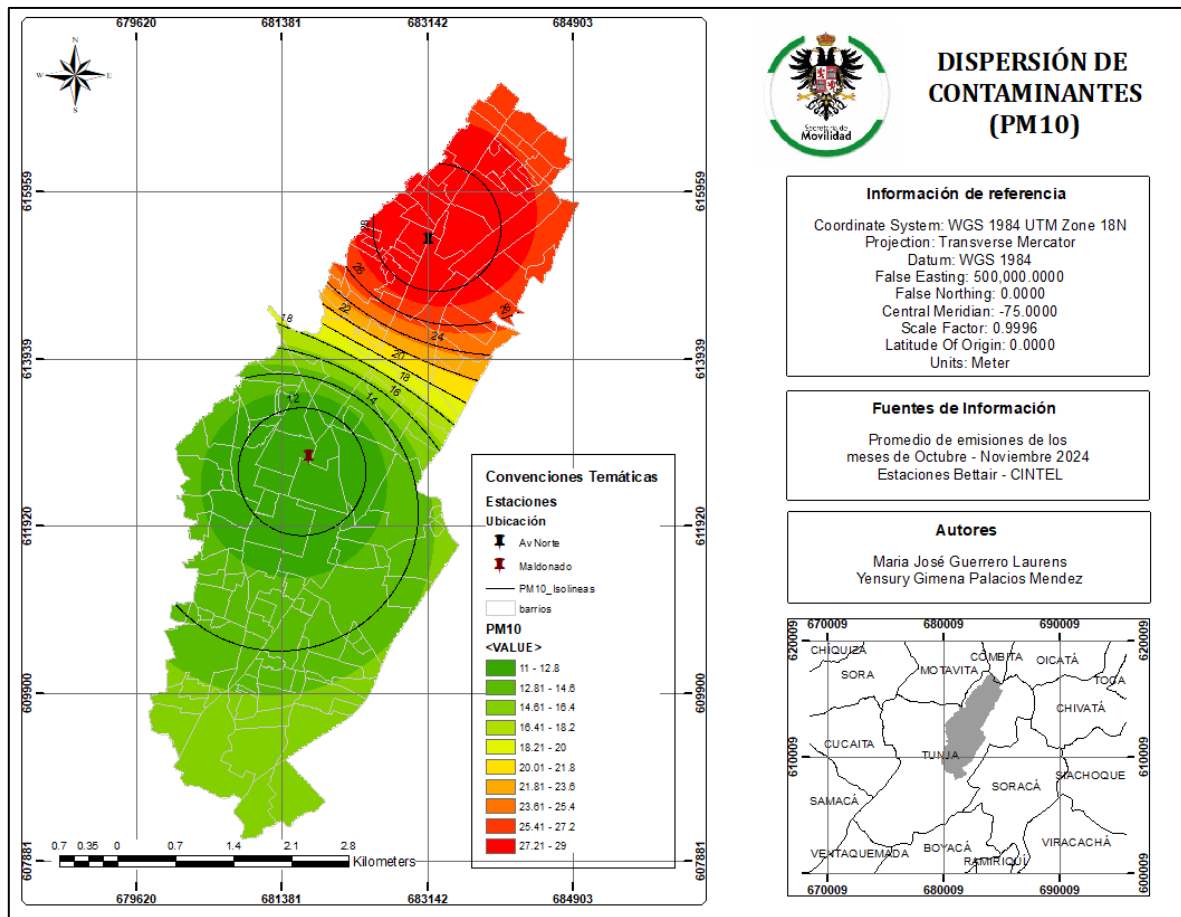
Fuente: Propia

Los resultados indican que la dispersión y concentración de material particulado PM2.5 en Tunja se encuentra dentro de los límites establecidos por la normatividad nacional. Sin embargo, en algunos puntos específicos, los niveles superan en $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el promedio recomendado por la OMS. A pesar de esta diferencia, el excedente no es significativo, por lo que, en términos generales, se puede considerar que Tunja cumple con los estándares de concentración para este contaminante.

➤ Mapa de dispersión de PM10

El mapa de PM10 evidencia una concentración significativa en la zona norte y centro-oeste, donde predominan los tonos naranjas y rojos, indicativos de niveles más altos de partículas gruesas. Este patrón sugiere la influencia de actividades de construcción, movimiento de suelo, tráfico vehicular y emisiones de fuentes puntuales en estas áreas. Las zonas centro-sur y suroeste, representadas en tonos verdes, muestran concentraciones más bajas de PM10, posiblemente debido a una menor presencia de actividades contaminantes o condiciones favorables para la dispersión de partículas.

Mapa 2 Dispersión de PM10



Fuente: Propia

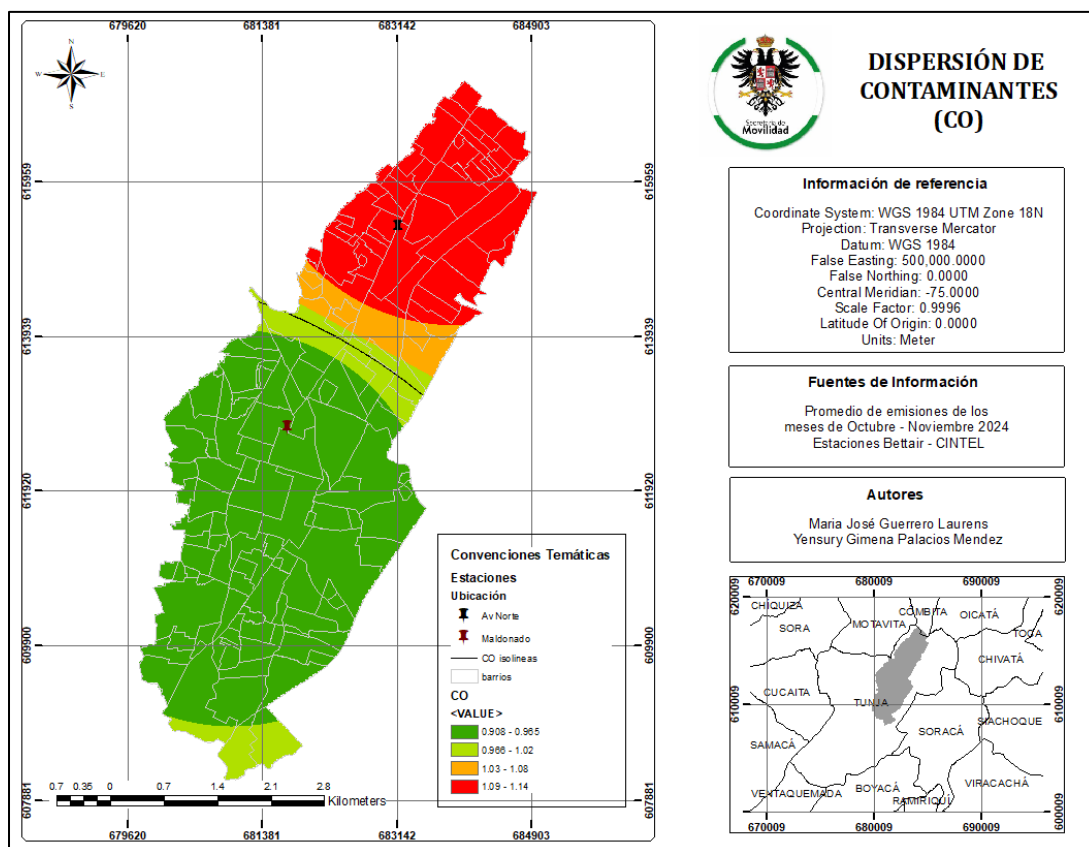
La situación con este contaminante difiere del caso anterior, ya que las concentraciones en un período de 24 horas no cumplen con los límites establecidos ni por la normatividad nacional ni por la OMS durante los picos registrados, alcanzando valores de hasta $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el período de observación de la calidad del aire en la ciudad. No obstante, en condiciones normales, las concentraciones diarias se mantienen dentro de los rangos permitidos, sin exceder los límites establecidos.

➤ Mapa de Monóxido de carbono (CO)

El mapa de dispersión de CO evidencia una concentración significativa en la zona norte, donde predominan los tonos rojos y naranjas, indicativos de niveles más altos de monóxido de carbono. Este patrón sugiere la influencia de una mayor densidad vehicular, congestión de tráfico y posibles emisiones generadas por fuentes fijas y móviles en estas áreas. Por el contrario, las zonas centro-sur y suroeste, representadas en tonos verdes, muestran

concentraciones más bajas, probablemente debido a una menor actividad vehicular y condiciones más favorables para la dispersión de contaminantes.

Mapa 3 Dispersión de CO



Fuente: propia

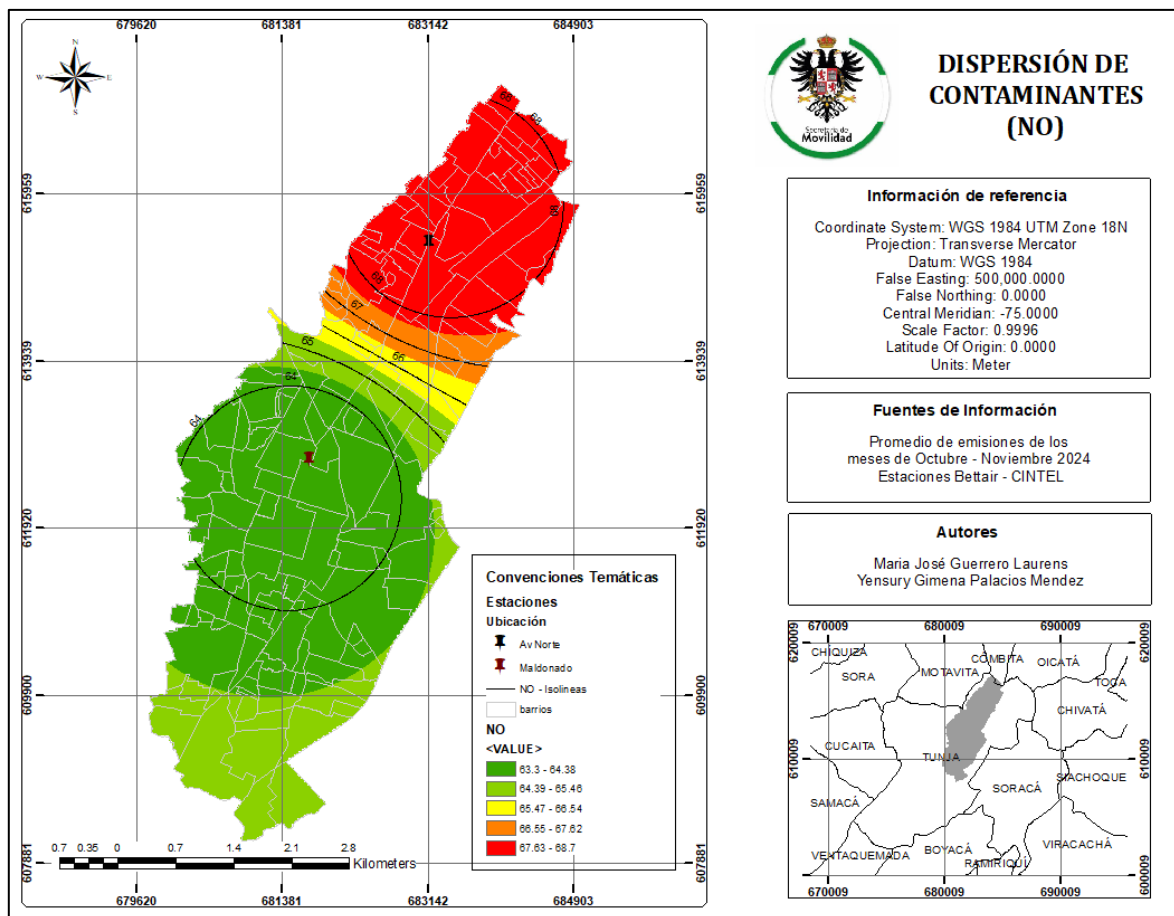
Las concentraciones de este contaminante no cumplen con los estándares establecidos por la OMS, ya que en ciertas ocasiones superan el límite permisible en aproximadamente $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, al igual que el PM10, la mayor parte del tiempo se mantienen dentro de un rango aceptable, por lo que no representa un problema significativo para la calidad del aire en la ciudad.

➤ Mapa de dispersión Óxido de Nitrógeno (NO)

Las concentraciones más altas de este contaminante se encuentran en la zona norte de la ciudad de Tunja, lo que indica niveles más altos de contaminación, esto se puede deber al intenso flujo vehicular en las vías principales, como la Avenida Norte, donde las emisiones de fuentes móviles, principalmente automóviles, son más significativas.

A medida que se avanza hacia el centro y el sur de la ciudad, las concentraciones disminuyen, lo que sugiere una menor actividad vehicular y, por lo tanto, una menor emisión de NO.

Mapa 4 Dispersión de NO



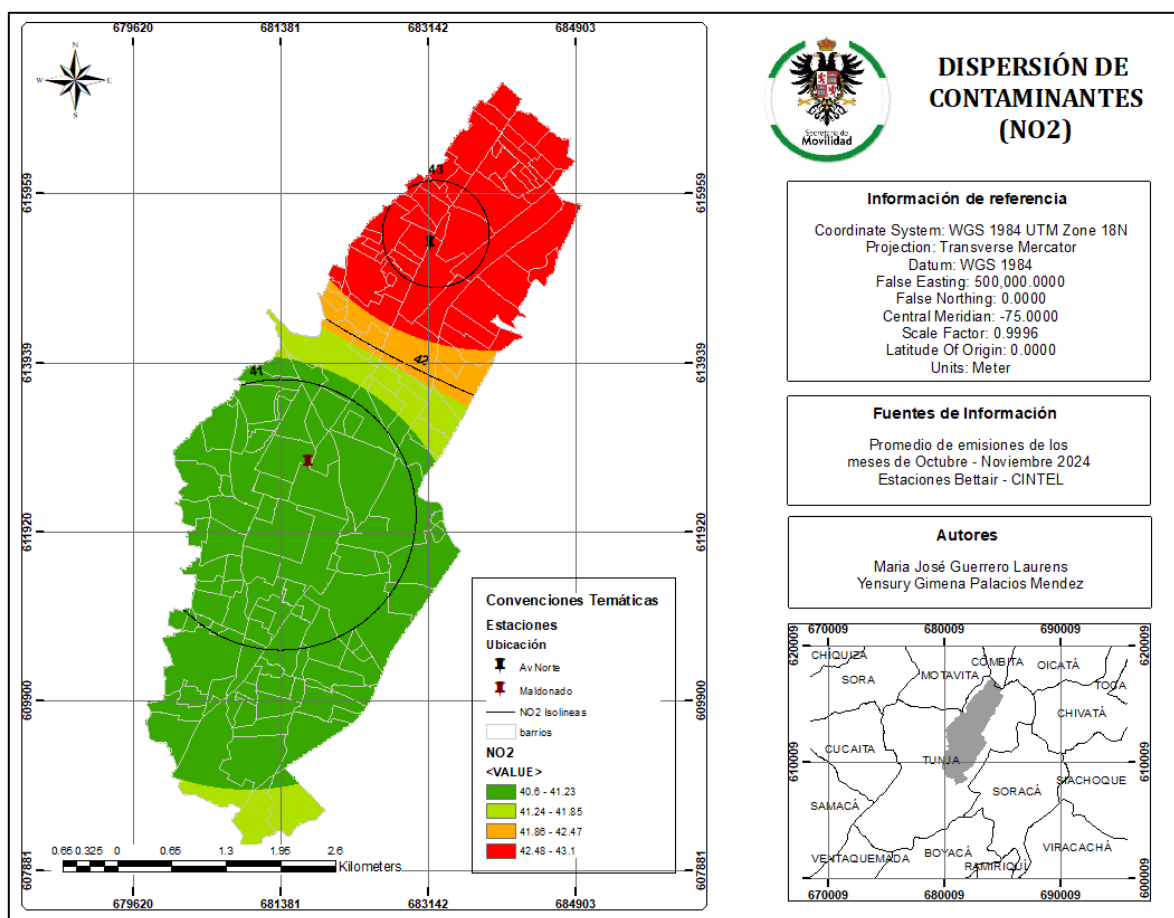
Fuente: Propia

Para este gas contaminante, no existe una regulación específica que establezca límites permisibles, lo que dificulta contar con una referencia clara para su comparación. Sin embargo, su presencia en el aire es relevante debido a su papel en la formación de otros contaminantes secundarios, como el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono troposférico, que sí cuentan con regulaciones estrictas debido a sus efectos en la salud y el medio ambiente. Por ello, aunque no haya un límite normativo directo para el NO, su monitoreo sigue siendo fundamental para evaluar la calidad del aire y su impacto en la ciudad.

➤ Mapa de dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

El dióxido de nitrógeno (NO_2) muestra un patrón de dispersión similar al del monóxido de nitrógeno, con concentraciones altas y niveles críticos en la zona norte de la ciudad. Las tonalidades rojas en el mapa indican que estas áreas reciben una mayor carga de contaminantes debido al alto flujo vehicular y las emisiones continuas generadas por los automóviles. Por el contrario, las zonas central y sur exhiben concentraciones más bajas, reflejadas en tonos verdes. El NO_2 es un contaminante secundario que se forma principalmente por la oxidación del monóxido de nitrógeno en presencia de oxígeno atmosférico.

Mapa 5 Dispersión de NO_2



Fuente: Propia

Al igual que otros contaminantes, el NO_2 supera en algunas ocasiones los límites máximos permisibles establecidos tanto por la normatividad nacional como por las recomendaciones de la OMS. No obstante, en condiciones habituales, sus concentraciones se mantienen dentro de los rangos aceptables. A pesar de ello, es importante monitorear este gas, ya que su exposición prolongada puede generar efectos adversos en la salud, especialmente en

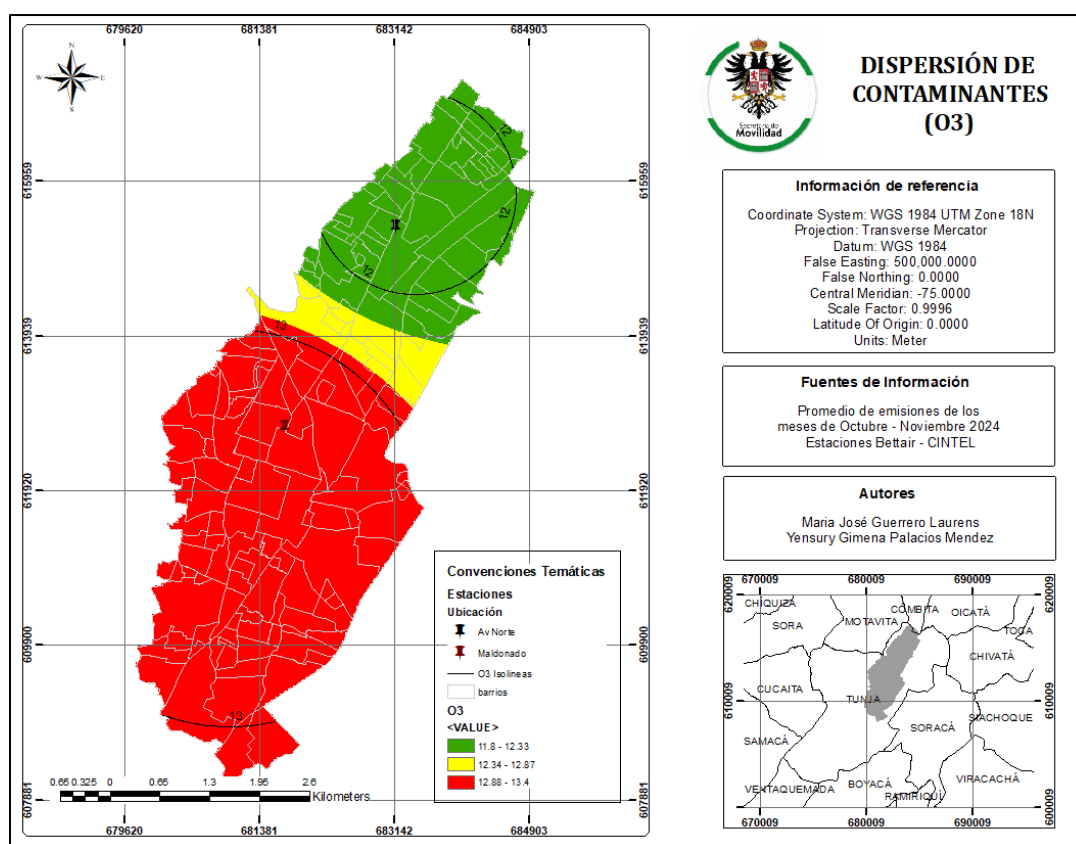
poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores, además de contribuir a la formación de contaminantes secundarios como el ozono troposférico.

➤ Mapa de dispersión Ozono O₃

El comportamiento del ozono troposférico (O₃) en la ciudad de Tunja presenta diferencias significativas en comparación con el NO y el NO₂. A diferencia de los contaminantes primarios, las mayores concentraciones de ozono se encuentran en la zona sur y central de la ciudad, donde predominan los tonos rojos. En contraste, la zona norte, a pesar de presentar altos niveles de NO y NO₂, muestra menores concentraciones de O₃.

Este patrón puede explicarse porque el ozono es un contaminante secundario que no es emitido directamente, sino que se forma a partir de la interacción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de radiación solar. En áreas con alta radiación solar y suficiente dispersión de precursores, el ozono se acumula más fácilmente, como se observa en las zonas menos densas en actividad vehicular.

Mapa 6 Dispersión de O₃



Fuente: Propia

Este gas, aunque se genera dentro de la ciudad, no supera los límites establecidos por la normatividad nacional ni por las recomendaciones de la OMS. Por ello, su presencia en el aire no representa un riesgo significativo para la salud de la población expuesta. Sin embargo, es importante mantener su monitoreo, ya que cambios en la dinámica del tráfico o en las condiciones ambientales podrían influir en sus concentraciones a futuro.

5.3 Externalidades del parque automotor

El crecimiento del parque automotor en las ciudades genera impactos significativos en la calidad del aire y la salud pública. En Tunja, la contaminación atmosférica derivada del tráfico vehicular ha sido identificada como una de las principales fuentes de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), así como de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC), todos ellos asociados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

➤ **Función Dosis – Respuesta:**

La relación entre la concentración de contaminantes y la incidencia de enfermedades se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \beta \times \Delta C \times P$$

Donde:

- ΔY : Cambio en la incidencia de enfermedades.
- β : Coeficiente de riesgo asociado al contaminante.
- ΔC : Cambio en la concentración del contaminante (PM₁₀, PM_{2.5}, etc.).
- P : Población expuesta.

➤ **Función de costo Salud**

Una vez estimado el incremento en la incidencia de enfermedades, los costos asociados a los nuevos casos se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$C_{total} = \Delta Y \times C_{unidad}$$

Donde:

- C_{total} : Costo total de enfermedades asociadas a la contaminación.
- C_{unidad} : Costo promedio por caso de enfermedad.

Para Tunja, según los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo, la media anual de PM10 es de 45 µg/m³. Con base en este dato, se calcula el valor de la externalidad de la siguiente manera:

➤ Función dosis – respuesta:

- La concentración promedio anual de PM₁₀ es de 45 µg/m³.
- La población de Tunja es aproximadamente 199,221 habitantes.
- El coeficiente de riesgo () para enfermedades respiratorias asociadas al PM₁₀ es de 0.0005.

$$\Delta Y = \beta \times \Delta C \times P$$

$$\Delta Y = 0.0005 \times 45 \times 199,221$$

$$\Delta Y = 4,482$$

Esto indica que cada año se generan aproximadamente 4,482 casos adicionales de enfermedades respiratorias debido a la contaminación del aire en la ciudad.

➤ Costos Económicos Asociados:

Para estimar el impacto económico, consideramos un costo promedio de \$500,000 COP por cada caso de enfermedad, incluyendo atención médica y pérdida de productividad.

$$C_{total} = 4,482 \times 500,000$$

$$C_{total} = 2,241,000,000 \text{ COP}$$

Esto significa que la contaminación del aire generada por el parque automotor en Tunja representa un costo anual de 2,241 millones de pesos colombianos en salud pública.

Los resultados indican que la contaminación vehicular tiene un impacto significativo en la salud de la población de Tunja. El hecho de que 4,482 personas sufran enfermedades respiratorias adicionales al año debido a la contaminación evidencia la necesidad de adoptar medidas urgentes para reducir las emisiones vehiculares. Desde una perspectiva económica, los 2,241 millones de pesos en costos de salud representan un gasto que podría evitarse con políticas adecuadas de movilidad sostenible, como la reducción del uso de vehículos particulares, la mejora del transporte público y la implementación de tecnologías vehiculares más limpias.

Cabe aclarar que estos datos se deben sustentar a través de encuestas en las sedes hospitalarias de la ciudad ya que esto es un calculo que se hace de forma descriptiva para lograr llegar a dimensionar las consecuencias que trae consigo la degradación de la calidad del aire de la ciudad.

5.4 Controles Ambientales para Fuentes Móviles en Tunja

En la actualidad, el crecimiento del parque automotor y la falta de control sobre las emisiones generadas por fuentes móviles representan desafíos significativos para la calidad del aire en ciudades como Tunja. Estas emisiones, que incluyen dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP), son responsables de impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente. En respuesta, las políticas públicas y los sistemas de monitoreo como los observatorios de movilidad pueden desempeñar un papel clave en la mitigación de estos efectos (Aguirre et al., 2011).

➤ Importancia de los controles ambientales

Las fuentes móviles son responsables de una parte considerable de las emisiones contaminantes en áreas urbanas. Estudios han demostrado que implementar sistemas de control ambiental efectivos, como inspecciones periódicas vehiculares y el fomento del transporte limpio, reduce significativamente las emisiones contaminantes. Por ejemplo, en países como Ecuador, la aplicación de sistemas de monitoreo integrados ha permitido establecer medidas más estrictas sobre los límites permisibles de emisiones, logrando una mejora en la calidad del aire urbano (Vega et al., 2022).

➤ Medidas propuestas para la ciudad de Tunja

Inspección y mantenimiento vehicular: La implementación de sistemas obligatorios de inspección técnica vehicular (ITV) ha demostrado ser eficaz para controlar las emisiones contaminantes. Esto incluye revisiones periódicas que certifiquen la eficiencia de los sistemas de escape y promuevan el mantenimiento preventivo de los vehículos. Estas inspecciones podrían complementarse con incentivos económicos para los propietarios que adopten tecnologías limpias, como vehículos híbridos o eléctricos (Vintimilla Jarrin, 2015).

Promoción del transporte sostenible: La inversión en infraestructura para transporte público eficiente y sostenible, como sistemas de buses eléctricos, puede ser una solución viable para reducir la dependencia del transporte individual motorizado. Según (Sarrazola Arenas, 2018), el fortalecimiento de las redes de transporte público puede disminuir hasta en un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que mejora la movilidad en las ciudades.

Campañas de sensibilización: Es fundamental educar a la población sobre los efectos de las emisiones vehiculares en la salud y el ambiente. Las campañas deben estar orientadas a fomentar la reducción del uso del automóvil, el uso compartido de vehículos y el cambio hacia medios de transporte no motorizados, como bicicletas (Romero et al., 2017).

Monitoreo de emisiones en tiempo real: La instalación de sensores ambientales en puntos críticos de la ciudad permite la medición continua de contaminantes. Esto facilita la evaluación de la efectividad de políticas como el ‘Día sin carro’ y proporciona datos confiables para la toma de decisiones (Sarrazola Arenas, 2018)

El control ambiental de fuentes móviles en Tunja requiere un enfoque integral que combine regulaciones estrictas, incentivos económicos, infraestructura adecuada y un sistema robusto de monitoreo y evaluación. La experiencia de otras ciudades y los estudios revisados demuestran que la acción coordinada puede mejorar sustancialmente la calidad del aire, contribuyendo a una movilidad más sostenible y saludable para los habitantes.

➤ **Referentes De Controles Ambientales Implementados En Otras Ciudades**

Además de las medidas propuestas para Tunja, es útil examinar experiencias exitosas en otras ciudades y países que han implementado estrategias innovadoras para el control de emisiones vehiculares. Algunas de estas prácticas pueden adaptarse al contexto local, y brindar mejor manejo sobre los vehículos que circulan dentro de Tunja aportando sin número de gases que afectan la calidad del aire de la ciudad.

1. Restricciones de circulación vehicular

- **Pico y placa ambiental:** En la Ciudad de México, el programa "Hoy No Circula" restringe la circulación de vehículos según el último dígito de la matrícula y su nivel de emisiones. Esto reduce el tránsito de los vehículos más contaminantes en días críticos de contaminación (Romero et al., 2017). Este tipo de medida también es aplicada dentro de diversas ciudades colombianas como Bogotá en donde recibe el nombre de día sin carro, esta medida debe ser estudiada por medio de medición de gases generados en cada ciudad ya que si la cantidad generada es baja la medida resultaría inútil y no el cambio no sería notable, además de que su eficiencia dependerá de las condiciones meteorológicas de la zona.
- **Zonas de bajas emisiones (LEZ):** Ciudades como Londres y París han delimitado áreas donde solo pueden circular vehículos que cumplan estándares estrictos de emisiones, fomentando la transición hacia alternativas menos contaminantes (Vintimilla Jarrin, 2015). Estas zonas, conocidas como Zonas de Bajas Emisiones (LEZ por sus siglas en

inglés), han resultado en una significativa disminución de contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el material particulado (MP). Además, estas iniciativas han promovido la adopción de tecnologías limpias, incentivando el uso de vehículos eléctricos, híbridos o de hidrógeno, así como el transporte público sostenible, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de calidad del aire en estas ciudades.

2. Uso de combustibles alternativos

El uso por parte de Brasil de biocombustibles como el etanol derivado de la caña de azúcar ha demostrado ser un modelo exitoso para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector del transporte. Este biocombustible se utiliza ampliamente en vehículos de combustible flexible y puede funcionar con gasolina, etanol o una mezcla de ambos. Desde el inicio del programa Pró-Álcool en 1975, el uso de etanol ha evitado más de 600 millones de toneladas de emisiones de CO₂. Además, el programa de etiquetado de vehículos de Brasil promueve la eficiencia energética de los vehículos híbridos flexibles, que utilizan etanol como combustible y reducen las emisiones en más de un 30% en comparación con los vehículos convencionales (AcademiaLab, 2023)

Estos avances también han tenido un impacto positivo en la calidad del aire en los centros urbanos, reduciendo significativamente emisiones como el monóxido de carbono y las partículas. Este enfoque no solo promueve la sostenibilidad ambiental, sino que también promueve el desarrollo económico local y la innovación tecnológica en la industria automotriz (Bioeconomía, 2024).

3. Políticas fiscales y económicas

Algunos países han adoptado enfoques innovadores para reducir las emisiones de los vehículos mediante instrumentos fiscales y subsidios. Por ejemplo:

Impuesto verde: Alemania aplica un impuesto a los vehículos basado en las emisiones de dióxido de carbono e impone un recargo progresivo a los vehículos con emisiones de dióxido de carbono que superan los 95 g/km. El impuesto, destinado a penalizar a los vehículos muy contaminantes y fomentar la compra de vehículos más respetuosos con el medio ambiente, como los eléctricos, está actualmente exento hasta 2030 (motor.es, 2020). El gobierno ofrece subsidios a quienes actualicen sus automóviles más antiguos por modelos con menores emisiones. La estrategia fomenta la modernización de la flota, ayudando a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (Márquez, 2024). Estas medidas no sólo apoyan la transición a tecnologías limpias sino que también envían un mensaje claro e importante a los consumidores, implementar prácticas de transporte sustentable.

4. Electrificación del transporte público

La transición al transporte público eléctrico está dando resultados positivos en varias ciudades. Shenzhen, China, ha lanzado una flota de autobuses totalmente eléctricos, lo que reduce significativamente las emisiones de gases contaminantes. En comparación con los vehículos diésel, las emisiones promedio de gases de efecto invernadero por kilómetro de la ciudad se reducen en un 40% y cada año se eliminan aproximadamente 4,316 millones de toneladas de partículas contaminantes. Además, la electrificación ayuda a reducir el ruido urbano y el efecto isla de calor. Este éxito se debe a subsidios gubernamentales, modelos de negocios innovadores y mejoras tecnológicas en la infraestructura de carga y reciclaje de baterías (Republica Sostenible, 2023). En el caso de Bogotá, la inclusión de autobuses eléctricos en el sistema TransMilenio marca un avance en el transporte sostenible, promoviendo viajes más limpios y eficientes (Escobar et al., 2017).

5. Tecnología avanzada para monitoreo

El uso de tecnologías avanzadas para monitorear las emisiones y los patrones de tráfico está transformando el transporte urbano. En Estados Unidos y China, se utilizan sensores remotos para medir las emisiones en tiempo real, lo que permite identificar y multar a los vehículos contaminantes. Estos dispositivos juegan un papel clave en la reducción del número de partículas nocivas en el aire (Aguirre et al., 2011). Mientras tanto, Singapur está utilizando inteligencia artificial para simular patrones de tráfico y optimizar el flujo de vehículos. Esta estrategia mejora significativamente la movilidad, reduce la congestión, reduce las emisiones y acorta los tiempos de viaje (Sarrazola Arenas, 2018).

6. Cultura de movilidad sostenible

La promoción de una cultura de transporte sostenible se refleja en iniciativas como la infraestructura para bicicletas y el uso compartido de vehículos. Ciudades como Ámsterdam y Copenhague están liderando el camino con sólidos sistemas ciclistas, fomentando el desarrollo de modos de transporte no motorizados y reduciendo la dependencia de los automóviles privados. Además, el uso compartido de coches en ciudades como Berlín optimiza el uso de los vehículos, reduce el número de coches en el tráfico y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas iniciativas no sólo tienen un impacto positivo en el medio ambiente sino que también promueven hábitos de viaje más sostenibles entre los ciudadanos.

7. CONCLUSIONES

La formulación del Observatorio de Movilidad de Tunja representa un avance significativo en la gestión del tráfico y la calidad del aire en la ciudad. Al integrar herramientas de monitoreo y análisis de datos, se establecen bases sólidas para la toma de decisiones informadas en materia de movilidad urbana y sostenibilidad ambiental. Su implementación permitirá la generación de reportes periódicos y la evaluación de políticas como el día sin carro, optimizando el tránsito y reduciendo la contaminación.

El análisis de emisiones vehiculares realizado con COPERT 5.8 evidenció que el parque automotor de Tunja es una fuente significativa de contaminación atmosférica, con emisiones anuales elevadas de CO₂, NO_x, material particulado y compuestos orgánicos volátiles. Estos contaminantes afectan no solo la calidad del aire, sino también la salud pública, generando costos económicos considerables para el sistema de salud. No obstante, este estudio establece una línea base para comenzar a evaluar las externalidades asociadas a la contaminación vehicular, recomendando que futuras investigaciones se apoyen en datos suministrados por centros de salud y en la implementación de tecnologías que permitan obtener mediciones más detalladas. Contar con datos específicos de concentraciones, tiempos de exposición y variables meteorológicas como dirección y velocidad del viento facilitaría la realización de estudios de dispersión con rosas de viento, mejorando así la precisión en la evaluación del impacto ambiental y en salud.

El parque automotor de Tunja presenta una coexistencia de vehículos de diferentes generaciones tecnológicas, donde una parte significativa aún opera bajo normativas antiguas con altos niveles de emisiones contaminantes. Esta situación agrava la problemática de la calidad del aire y resalta la necesidad de implementar estrategias de renovación vehicular. La modernización del parque automotor, junto con políticas efectivas para el retiro progresivo de vehículos altamente contaminantes, permitiría reducir significativamente las emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, con beneficios directos para la salud pública y el medio ambiente. La experiencia de otras ciudades demuestra que incentivos para la adopción de tecnologías limpias, junto con regulaciones más estrictas sobre las emisiones vehiculares, pueden ser herramientas clave para avanzar hacia una movilidad más sostenible en Tunja.

Si bien se consideró la realización de análisis de dispersión basados en rosas de viento para comprender mejor la distribución de contaminantes, esta tarea no pudo llevarse a cabo debido a la falta de una estación meteorológica con datos completos de dirección y velocidad del viento para el año de estudio. Contar con esta información en el futuro permitiría mejorar el análisis de estabilidad atmosférica y dispersión de contaminantes, lo que contribuiría a la formulación de estrategias más efectivas de control de la contaminación en la ciudad.

Para asegurar el éxito del Observatorio de Movilidad, es fundamental su institucionalización y su integración con entidades gubernamentales, académicas y el sector privado, esta colaboración permitirá desarrollar y fortalecer la infraestructura necesaria para mejorar la calidad de los datos recopilados. La implementación de sensores de calidad del aire y modelos de predicción de tráfico optimizará la capacidad de análisis, facilitando una planificación urbana más eficiente y sostenible a largo plazo.

8. RECOMENDACIONES

A partir de los hallazgos obtenidos en este estudio, se identificaron diversas oportunidades de mejora para la gestión de la movilidad y la calidad del aire en Tunja, si bien este análisis proporciona una línea base para la evaluación de externalidades ambientales y de salud, es necesario fortalecer las estrategias de monitoreo y control, así como promover la adopción de tecnologías y políticas que reduzcan el impacto del parque automotor. En este sentido, se presentan las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar la planificación urbana, mejorar la calidad del aire y avanzar hacia una movilidad más sostenible en la ciudad.

- Ampliar los períodos de muestreo y mejorar la cobertura de monitoreo en puntos estratégicos de la ciudad para validar con mayor precisión la calidad del aire. La información obtenida permitirá mejorar los mapas de dispersión, identificando zonas críticas y facilitando la implementación de medidas correctivas más efectivas.
- Fomentar la renovación del parque automotor mediante incentivos para la adopción de tecnologías más limpias y la implementación de estándares ambientales más exigentes. La modernización de los vehículos reducirá significativamente las emisiones de contaminantes atmosféricos y sus impactos negativos en la salud pública.
- Implementar planes de regulación de emisiones vehiculares, priorizando inspecciones periódicas y programas de mantenimiento para los vehículos más contaminantes. Asimismo, se recomienda promover el uso de combustibles menos contaminantes y fortalecer las estrategias de transición hacia tecnologías de movilidad sostenible.
- Optimizar el sistema de transporte público, incorporando vehículos con tecnologías de bajas emisiones, mejorando la eficiencia de las rutas y promoviendo medios de transporte no motorizados, como la bicicleta y la movilidad peatonal. Estas acciones contribuirán a reducir la dependencia del transporte privado y las emisiones asociadas.
- Utilizar los mapas de dispersión de contaminantes como herramientas clave en la planificación territorial, asegurando que las políticas urbanas reduzcan la exposición de la población a zonas de alta contaminación y fomenten un desarrollo sostenible de la ciudad.

- Fortalecer la educación ambiental y la conciencia ciudadana mediante programas dirigidos a la población sobre el impacto del parque automotor en la calidad del aire y la importancia de hábitos de movilidad sostenible. Incluir campañas de sensibilización y participación comunitaria contribuirá a una transformación cultural en el uso del transporte.
- Impulsar la investigación continua en calidad del aire y movilidad, promoviendo la recopilación y el análisis sistemático de datos para mejorar la toma de decisiones. Se recomienda articular esfuerzos entre entidades gubernamentales, académicas y del sector privado para garantizar una gestión eficiente de la información.
- Mejorar la gestión de información sobre externalidades ambientales y de salud, complementando el análisis numérico con datos obtenidos a través de encuestas en centros de salud y hogares. Esta estrategia permitirá obtener una visión más detallada de los efectos en la población y facilitará la formulación de políticas públicas más precisas.
- Fortalecer la infraestructura de monitoreo ambiental y meteorológico, promoviendo la instalación de estaciones con capacidad para medir dirección y velocidad del viento, lo que permitirá en el futuro realizar estudios más detallados de dispersión de contaminantes mediante rosas de viento y otros modelos avanzados de análisis.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AcademiaLab. (2023). Combustible de etanol en Brasil. https://Academia-Lab.Com/Enciclopedia/Combustible-de-Etanol-En-Brasil/#google_vignette.
- Aguirre, L., Herrera, I., & Granada, F. (2011). CALIDAD PROCEDIMIENTO PARA LAS MEDIDAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE FUENTES MÓVILES Y FIJAS.
- Agudo Juela, M. D. (2021). Propuesta para la puesta en marcha de un observatorio académico de movilidad sostenible y seguridad vial en la ciudad de Cuenca de la Universidad Politécnica Salesiana. Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.upse.edu.ec/handle/123456789/22496>
- Baquero, E. C. (2019). Sistema de monitoreo de contaminación atmosférica producida por el parque automotor de la ciudad de Tuluá usando el Internet de las Cosas. <https://repositorio.uceva.edu.co/bitstream/handle/20.500.12993/2620/T00031654.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bioeconomia. (2024, October 2). En Brasil, Stellantis da un paso clave para descarbonizar el transporte. <https://Www.Bioeconomia.Info/2024/10/02/En-Brasil-Stellantis-Da-Un-Paso-Clave-Para-Descarbonizar-El-Transporte/>.
- Borge, R., Alexander, A., & Pérez, J. (2018). Review of the Effectiveness of Traffic Management Strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.008>
- Calixto, R. (2024). Comportamiento de la movilidad vehicular en ciudades pequeñas. Estudio de caso: Tunja, Boyacá, Colombia. Universidad Santo Tomas, 7.
- Cerda, C. N. H., Galarza, A. Á., & Alonso, D. G. C. (2022). Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México. *Revista De Ciencias Ambientales*, 57(1), 1–27. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.8>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). Ley 1972 de 2019: Medidas para la reducción de emisiones de fuentes móviles. *Diario Oficial*.
- Comisión Europea. (2017). Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión de 1 de junio de 2017 por el que se completa el Reglamento (CE) No 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a la homologación de vehículos de motor en relación con sus emisiones y consumo de combustible y se modifica el Reglamento (CE) No 692/2008 de la Comisión. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L175, 1-643. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32017R1151>
- European Commission. (2021). Euro Emission Standards for Motor Vehicles. Retrieved from European Commission.
- Gutiérrez Andrade, O. (2018). Aplicación de instrumentos económicos e intervención estatal en el problema de las externalidades. Redalyc. <https://www.redalyc.org/pdf/4259/425942516004.pdf>

- Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. *Science of the Total Environment*, 249(1-3), 85-101. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6)
- Jaramillo, J. (2020). *La bicicleta como un medio de transporte que ayuda mitigar los problemas de movilidad en la localidad de Chapinero* [Tesis, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/38640>
- Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista de Ingeniería*, 35, 53-60. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372011000200012&script=sci_arttext
- Londoño-Ciro, L. A., Cañón-Barriga, J. E., & Giraldo-Ocampo, J. D. (2017). Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire. *Revista de Ingeniería*, 35, 25-32. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-386X2017000100112&script=sci_arttext
- Martínez-Ángel, J. D. (2018). Movilidad motorizada, impacto ambiental, alternativas y perspectivas futuras: consideraciones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Revista de Salud Pública*, 20(1), 126–131. <https://doi.org/10.15446/RSAP.V20N1.57038>
- Márquez, K. (2024, November 10). Impuestos en Alemania: ¿cuáles son y cuánto debo pagar? <https://Esim.Holafly.Com/Es/Blog/Impuestos/Impuestos-En-Alemania/>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2008). Resolución 910 de 2008. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Resolución 0762 de 2022. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Motor.es. (2020, September 24). Alemania reforma su impuesto de circulación para 2021, las emisiones de CO2 protagonistas. <https://Www.Motor.Es/Noticias/Alemania-Impuesto-Circulacion-2021-Emisiones-202071179.Html>.
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E. R., Keogh, D. U., & Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8113-8138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>
- Morales-Pinzón, T., & Arias Mendoza, J. J. (2013). Contaminación vehicular en la conurbación Pereira-Dosquebradas. *Revista de Ingeniería*, 35, 15-22. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742013000200009&script=sci_arttext
- Quiñones Cantor, L. (2008). Evaluación de los inventarios de emisiones de fuentes móviles de Bogotá mediante datos de la red de calidad de aire. *Universidad Nacional de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12250>

- Parlamento Europeo y del Consejo. (2007). Reglamento (CE) No 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2007 sobre la homologación de vehículos de motor en relación con las emisiones de sus gases contaminantes y por el que se modifican las Directivas 70/220/CEE y 80/1268/CEE del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea, L171, 1-16. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32007R0715>
- Parlamento Europeo y del Consejo. (1998). Directiva 98/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas contra la contaminación del aire por las emisiones de los vehículos y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea, L350, 1-57. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31998L0069>
- Quiñones Cantor, L. (2008). Evaluación de los inventarios de emisiones de fuentes móviles de Bogotá mediante datos de la red de calidad de aire. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12250>
- Republica Sostenible. (2023, November 2). Energías limpias. <https://Especial.Larepublica.Pe/La-Republica-Sostenible/2023/11/02/Shenzhen-La-Ciudad-Que-Opera-Solo-Con-Buses-100-Electricos-128468>.
- Romero, J., Jiménez García, J. A., Torres Tovar, R., Gaspar Sánchez, N., & Cruz Mejía, O. (2017). TÓPICOS DE TRANSPORTE Y MOVILIDAD. https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/53839188/TOPICOS_DE_TRANSPORTE_Y_MOVILIDAD_CD_con_isbn-libre.pdf?1499878045=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTOPICOS_DE_TRANSPORTE_Y_MOVILIDAD_IMPACT.pdf&Expires=1733803762&Signature=Lx0wQccil1qOwq3b2hvtLG~hzWRII5zY-tDOTSz796IP-CyqVbKSJyUg4U1qbM~D79vnKHGYwyS1KHqbLkFmYm2jKkLdeCL-jEw4KYDTH0yIKoCewp2KOqQO3WlzZSiG2TkvoVX1AGLo7IqZAwi3pwp6rwBY~T5fj--I2TmUGCujDj-bQk3XRtaXEYhDQN~Kx7TiDGQZgCG~Y7F3gHfqGJ~n80JpiZkCxXydSOizDZfuGUtFWwophvzQkLuM5BbuPsn6i2VfljA0Stecgk0PZuMcvkJ-w59KHauSmJLfJc4RPF3T8UfwKpN-b-iZd6Hal~yqK5E3LuB3bLOvADliQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA#page=173
- Romero, G. A. (2015). Efectos ecológicos del establecimiento del día sin carro en las ciudades de Tunja y Bogotá. Universidad Santo Tomas .
- Rueda Gómez, N. J., & González Afanador, J. M. (2010). Impacto por externalidades del sistema integrado de transporte masivo del área metropolitana de Bucaramanga. Revista de la Facultad de Ingeniería, 8(2), 47-62. <https://doi.org/10.15332/rev.m.v8i2.982>
- Sarrazola Arenas, A. M. (2018). Control para redes de tráfico urbano considerando emisiones de fuentes móviles.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69477/1020427988.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Summary of the Clean Air Act. Retrieved from EPA.
- Vega, M., Torres, R., Torres, A., & Vega, P. (2022). EFECTIVIDAD DE LA NORMATIVA LEGAL DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PRODUCIDA POR FUENTES MÓVILES EN EL CANTÓN CUENCA. <https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/451928f8-0f13-4e8e-bc80-d2f89e9ea91e/content>
- Velasco, S., López, G., & Aguirre, A. (2023). La relación entre movilidad y calidad del aire en contextos urbanos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 11(1), 1-12. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962023000100005
- Vintimilla Jarrin, P. F. (2015). ANALISIS DE RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE FUENTES MÓVILES A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA REVISIÓN TECNICA VEHICULAR EN EL CANTÓN CUENCA. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7647/1/UPS-CT004530.pdf>
- Zhang, K., & Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of the Total Environment*, 450-451, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>

10. ANEXOS

➤ Informe día sin carro:

https://drive.google.com/file/d/1xpKpLUb8R1skYTrT2ormT4VXcjbq6FU8/view?usp=drive_link

➤ Actas de reuniones:

- <https://drive.google.com/file/d/150qy3nRC1ra8C1i2bBfH4PAS8grJGmhy/view?usp=sharing>
- <https://drive.google.com/file/d/1k7SUVwVV3F1T6bx355Mw92qqp-8v4YtU/view?usp=sharing>
- <https://docs.google.com/document/d/1YjY7T6IXgxL5Tjdsh-GE18WqFQWnxm1FG7Yuf7MVP4/edit?usp=sharing>