

Estimación de emisiones de dióxido de carbono y estrategias de mitigación propuestas para el sector de transporte terrestre del Valle de Aburrá

J.H. Cano Beltran¹ and S.P. Salas Chavez¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Javeriana - Cali, Calle 18 118-250, Cali, Colombia

July 31, 2025

Abstract

This study evaluates the carbon dioxide (CO₂) emissions generated by freight road transport in the Valle de Aburrá, Colombia, and analyzes the potential impact of various mitigation strategies toward the year 2050. By implementing the LEAP model and integrating official data on the vehicle fleet, emission factors, and distances traveled, the study estimated current emissions and projected three scenarios: the *BAU Scenario* (Business As Usual – Tendencial), which assumes no regulatory or technological intervention; the *MOD Scenario* (Moderate Scenario), which incorporates Euro VI standards, a scrappage and/or mandatory vehicle retirement program, and a stable 15% share of electric vehicles across all categories; and the *TRA Scenario* (Optimistic Scenario of Accelerated Transition to 2050), which involves a high level of fleet electrification reaching an 80% electric vehicle share by 2050 alongside progressive improvements in diesel engine efficiency. The results show that the MOD scenario reduces cumulative emissions by 28% by 2050 compared to BAU, while the TRA scenario achieves a 54% reduction. This analysis provides technical evidence to inform the formulation of public policies focused on the decarbonization of freight transport through electrification and technological upgrades.

1 Introducción

El crecimiento acelerado del parque automotor y la continua dependencia

de combustibles fósiles han tenido un impacto negativo en la calidad del aire y la salud pública [1]. La Organización Mundial de la Salud estima que la con-

taminación atmosférica es responsable de millones de muertes prematuras cada año, siendo las enfermedades respiratorias y cardiovasculares las principales consecuencias de dicha exposición. En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación reporta alrededor de 8.000 muertes anuales asociadas a la contaminación del aire [2].

Entre las emisiones contaminantes, se destacan los gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO₂), cuyas concentraciones han aumentado de manera significativa. Este incremento ha contribuido al fenómeno conocido como cambio climático de origen antrópico [3].

En el sector transporte, los camiones ligeros, medianos y pesados representan una fuente importante de emisiones, contribuyendo con el 42% de las emisiones de CO₂ generadas por el transporte, lo que equivale al 4,6% del total de las emisiones de CO₂ en Colombia en el año 2019. [4]. En el Valle de Aburrá, el inventario de emisiones del año 2022, indica que las emisiones del sector de transporte ascendieron a 3.483.967 ton CO₂ [14]. En comparación con el inventario de 2011, esto representa un incremento del 16%. En cuanto al aporte por tipo de combustible, la gasolina, el diésel y el gas natural en vehículos contribuyeron con el 60%, 37,6% y 2,4%, respectivamente en el año 2022.

Adicionalmente, el parque automotor del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, paso de 797.568 vehículos en el año 2011 [13] a 2.212.499 vehículos en el

año 2022 [14], lo que representa un crecimiento cercano al triple en poco más de una década. Este crecimiento supone un riesgo en el contexto de los escenarios de cambio climático y los reportes nacionales sobre emisiones, rente a este panorama, estudios internacionales han analizado estrategias de mitigación basadas en tecnologías más limpias. En Cochabamba (Bolivia), por ejemplo, se estimó que la sustitución de 1.766 minibuses diésel por versiones eléctricas permitiría reducir en un 7,36% las emisiones de CO₂ del parque automotor urbano, resaltando la necesidad de políticas de incentivo y financiamiento para viabilizar la transición tecnológica [15]. En Costa Rica, el modelo COPERT 5.2 se aplicó para proyectar escenarios de mitigación al año 2030, considerando la incorporación de autobuses eléctricos, el uso de biodiésel y combustibles bajos en azufre. Se estimó que estos autobuses podrían representar el 13,9% del parque vehicular, reduciendo el consumo energético del transporte terrestre en un 27% [16]. En la Zona Metropolitana del Valle de México, la evaluación de vehículos eléctricos como alternativa de mitigación muestra que su efectividad dependerá de que la electricidad provenga de fuentes renovables como la solar, eólica o geotérmica [17]. El estudio también destaca el potencial de los autobuses eléctricos y tractocamiones híbridos para contribuir al cumplimiento de la meta nacional de reducir en un 21% las emisiones del sector transporte al 2030 teniendo en cuenta que el 73% de la carga en Colombia se transporta en camiones.

Para evaluar el impacto ambiental del

sector transporte se han desarrollado distintos métodos de estimación de emisiones de CO₂, los cuales varían en complejidad y precisión según la disponibilidad de datos y los objetivos del análisis. Entre los enfoques más utilizados se encuentran los métodos basados en factores de emisión, que estiman las emisiones a partir del consumo de combustible o la distancia recorrida [8]. De igual forma, los modelos de simulación como *MOVES* (Motor Vehicle Emission Simulator) y *COPERT* (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport) permiten calcular emisiones en función de características específicas del parque vehicular, condiciones de tráfico y perfiles de conducción [9].

En Europa, el modelo *COPERT 4* ha sido utilizado. Un estudio realizado en Turquía propone un enfoque híbrido que combina datos desagregados de estudios de carga por eje, circulación vehicular y flujo de mercancías, para calcular las emisiones del transporte de carga por carretera mediante este modelo. Los resultados revelaron que, entre 2000 y 2009, las emisiones de CO₂ se mantuvieron estables, pero la participación de camiones articulados se triplicó, mientras que la de camiones rígidos disminuyó en un 25%. El estudio demuestra que el uso de datos desagregados mejora la comprensión del comportamiento del sector transporte y permite formular políticas más eficaces para la reducción de emisiones [10].

Por su parte, el modelo *IVE* (International Vehicle Emissions), diseñado para países en desarrollo, ha sido aplicado

exitosamente en entornos urbanos con alta densidad vehicular y disponibilidad limitada de datos. Según su manual de usuario, este modelo considera factores como la tecnología del vehículo, los patrones de conducción, el uso del aire acondicionado, las condiciones ambientales locales y los sistemas de control de emisiones, lo que lo convierte en una herramienta flexible y de bajo costo para contextos urbanos [11]. En un estudio reciente en la Ciudad de Panamá, se utilizó el modelo *IVE* para estimar las emisiones en una de las avenidas más transitadas, demostrando que el 98% de los contaminantes emitidos correspondían al monóxido de carbono (CO), principalmente por vehículos de gasolina. Además, se identificó que los vehículos diésel, aunque menos numerosos, fueron responsables del 66% de las emisiones de material particulado (PM_x) [12]. Este caso resalta la utilidad del modelo *IVE* para estimar emisiones bajo condiciones reales del parque automotor urbano latinoamericano.

El uso de herramientas avanzadas para la estimación de emisiones es clave en la planificación de estrategias de mitigación. En este sentido, el modelo *LEAP* ha sido utilizado en estudios recientes para evaluar escenarios de reducción de emisiones en el sector transporte. Un estudio desarrollado en Qatar integró datos reales de tráfico en *LEAP* para estimar emisiones actuales y proyectar diferentes escenarios de mitigación, incluyendo la mejora del transporte público, la electrificación de la flota y el uso de combustibles más limpios. Los resultados evidenciaron

que la categoría de vehículos ligeros es la principal fuente de emisiones y que la implementación de estrategias sostenibles podría generar reducciones significativas en los GEI. La capacidad de LEAP para modelar distintos escenarios y evaluar su impacto a largo plazo lo posiciona como una herramienta valiosa para estudios de transporte, proporcionando información crucial para la formulación de políticas públicas [18].

El transporte de carga por carretera constituye una de las principales fuentes de emisiones de (CO₂) a escala mundial. En 2023, este subsector generó aproximadamente el 15% de las emisiones energéticas globales y ha mantenido una tendencia ascendente desde 2015 [19, 20]. Debido a que los vehículos pesados como camiones rígidos, tractocamiones y volquetas presentan factores de emisión y consumos energéticos significativamente superiores a los de los automóviles ligeros, apenas el 4% del parque automotor mundial es responsable de casi la mitad de la demanda de diésel [21]. Aunque recientemente han entrado en vigor regulaciones más estrictas, como los estándares *Phase 3* de la EPA para vehículos pesados [22, 23], estos lineamientos aún no permiten alinear el sector con la trayectoria de 1,5°C establecida por el IPCC, la cual exige reducciones de hasta el 90% en la intensidad de carbono del transporte de carga para 2050 [24].

En este sentido, un estudio sobre el autotransporte en México advierte que, si no se implementan medidas, el consumo energético del sector aumentaría un 78% y

las emisiones de CO un 73% al 2030. No obstante, mediante escenarios de eficiencia energética, electrificación parcial, cambio de combustibles e innovación logística, se podría lograr una reducción del 30% respecto al escenario tendencial [25]. Además, un estudio enfocado en Colombia propone un modelo con enfoque de costo marginal de abatimiento (MACC) para proyectar escenarios de mitigación en el transporte entre 2010 y 2050. Se estima un potencial de reducción acumulada del 8% hasta 2030 y del 18% hasta 2050 respecto al escenario tendencial, con costos de implementación estimados entre el 0,5% y el 4% del PIB anual [26–29].

Proyecciones prospectivas indican que, en ausencia de medidas adicionales, las emisiones de los vehículos pesados podrían aumentar entre 20% y 40% durante las próximas dos décadas, impulsadas por el crecimiento de la demanda logística y la lenta renovación de la flota en diversos países emergentes [30–32].

Para revertir los desafíos descritos, diversos estudios coinciden en la necesidad de adoptar una estrategia integral articulada bajo el paradigma *Evitar–Cambiar–Mejorar* [33, 34]. El componente *Evitar* se orienta a reducir la demanda de transporte motorizado mediante la optimización de cadenas logísticas, la consolidación de carga y la planificación urbana de alta densidad; *Cambiar* propone desplazar el movimiento de mercancías hacia modos con menor huella de carbono, como el ferrocarril, o hacia esquemas colaborativos de distribución; mientras que *Mejorar* se

centra en la introducción acelerada de tecnologías cero emisiones con vehículos eléctricos a batería, pilas de combustible de hidrógeno y biocombustibles avanzados, apoyadas por sistemas de gestión energética e infraestructura de recarga de alta potencia [35–37]. Proyecciones recientes muestran que la electrificación masiva, complementada con biocombustibles sostenibles e hidrógeno verde para trayectos de larga distancia, puede aportar más de la mitad de las reducciones requeridas en el sector hacia 2050 [21,24]. No obstante, su despliegue depende de incentivos fiscales adecuados, señales de precios de carbono eficientes y una planificación coordinada de la infraestructura de recarga, aspectos que aún presentan retrasos respecto de los objetivos climáticos internacionales [19,38]. En este contexto, resulta necesario integrar de forma sistemática las medidas tecnológicas y de gestión de la demanda en las hojas de ruta nacionales y regionales, con el fin de alinear el desempeño del transporte de carga con los compromisos globales de descarbonización.

En este contexto, es fundamental analizar las metodologías de estimación de emisiones utilizadas tanto a nivel nacional como internacional, así como evaluar su aplicabilidad en el contexto local. Esto permitirá diseñar estrategias de mitigación eficaces y adecuadas para el sector, alineadas con las necesidades del territorio [37].

El presente estudio se estructura en tres ejes principales: (1) identificación y análisis de metodologías existentes para la

estimación de emisiones de CO₂ del parque automotor, (2) estimación de las emisiones actuales en el Valle de Aburrá a partir de datos de registros vehiculares, y (3) cuantificación del impacto de distintas estrategias de mitigación en la reducción de emisiones. Dentro de estas estrategias se incluyen la adopción de tecnologías vehiculares más limpias, el uso de combustibles alternativos y la renovación de la flota con criterios de eficiencia energética [40,41]. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan al diseño de políticas públicas orientadas a promover un sistema de transporte más sostenible, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

2 Metodología

Para estimar las emisiones de CO₂ en el sector del transporte terrestre en el Valle de Aburrá y analizar posibles estrategias de mitigación, la metodología se desarrolló en cuatro fases:

2.1 Recopilación y procesamiento de datos

Este estudio adoptó un enfoque cuantitativo, descriptivo y retrospectivo, basado en información secundaria oficial para estimar las emisiones anuales de CO₂ generadas por el sector del transporte terrestre en el Valle de Aburrá durante el período 2015-2024. Además, se evaluaron posibles políticas de mitigación mediante la proyección de escenarios hasta el año 2050.

Para ello, se utilizó la herramienta especializada LEAP, versión 2024.2.0.10, reconocida internacionalmente en estu-

dios de consumo energético y emisiones atmosféricas.

La información base se obtuvo del Registro Único Nacional de Tránsito y del Ministerio de Transporte de Colombia. Los datos fueron organizados por tipo de vehículo y combustible, asegurando su validez y completitud antes del modelado.

En 2024, el parque automotor de carga terrestre registrado en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ascendió a 50.566 vehículos, cuya distribución se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Distribución del parque automotor de carga por tipo de vehículo y combustible (2024)

Categoría	Diésel	Gasolina	GNV
Camiones livianos	5.486	579	18
Camiones medianos	17.613	3.123	32
Camiones pesados	7.446	483	121
Tractocamiones	9.076	126	138
Volquetas	6.030	276	19

2.2 Configuración del modelo

A partir de la información recopilada, se realizó un proceso de validación y depuración de los datos para asegurar su consistencia y completitud antes del modelado. Posteriormente, se configuró el modelo de emisiones en LEAP, considerando las siguientes variables: Factores de emisión proporcionados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006, expresados en kg de CO₂ por km recorrido, tal como se muestra en la Tabla 2

Tabla 2: Factores de emisión de CO₂ por categoría vehicular y tipo de combustible (kg CO₂/km)

Categoría	Diésel	Gasolina	GNV
Camiones livianos	0.18	0.22	0.20
Camiones medianos	0.30	0.45	0.33
Camiones pesados	0.45	0.75	0.50
Tractocamiones	0.50	0.90	0.55
Volquetas	0.40	0.65	0.44

Y distancias promedio anuales recorridas según la categoría vehicular (Tabla 3).

Tabla 3: Distancia promedio anual recorrida por categoría vehicular

Categoría	Km/año
Camiones livianos	30.000
Camiones medianos	60.000
Camiones pesados	70.000
Tractocamiones	80.000
Volquetas	50.000

2.3 Cálculo de Emisiones

Para estimar el cálculo de CO₂ por tipo de combustible, se definen las siguientes variables:

- $EV_{t,f}$: consumo energético específico de la categoría t con combustible f , en MJ/100 km.
- VKT_t : distancia anual promedio por vehículo de la categoría t , en km/año.
- $N_{t,f}$: número de vehículos de la categoría t que utilizan combustible f .
- PCI_f : poder calorífico inferior del combustible f , en MJ/L.
- EF_f : factor de emisión de CO₂ del combustible f , en kg CO₂/GJ

(Gasolina ≈ 69 , Diésel ≈ 74 , GNV ≈ 56).

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

Demanda de energía por categoría y combustible (en MJ):

$$D_{t,f}(\text{MJ}) = \frac{EV_{t,f} \times VKT_t \times N_{t,f}}{100}$$

Conversión a terajoules (TJ):

$$D_{t,f}(\text{TJ}) = \frac{D_{t,f}(\text{MJ})}{10^6}$$

Conversión a energía útil en gigajoules (GJ):

$$Q_{t,f}(\text{GJ}) = D_{t,f}(\text{TJ}) \times 10^3$$

Cálculo de emisiones de CO₂ en kilogramos:

$$E_{\text{CO}_2,t,f}(\text{kg}) = Q_{t,f}(\text{GJ}) \times EF_f$$

Conversión de emisiones a toneladas métricas (Mg):

$$E_{\text{CO}_2,t,f}(\text{Mg}) = \frac{E_{\text{CO}_2,t,f}(\text{kg})}{10^3}$$

Emisiones totales de CO₂ para toda la flota:

$$E_{\text{CO}_2} = \sum_t \sum_f E_{\text{CO}_2,t,f}(\text{Mg})$$

De este modo, el modelo LEAP contabiliza explícitamente la cantidad de vehículos de cada categoría que utilizan cada tipo de combustible, calcula su demanda energética específica, aplica el correspondiente factor de emisión y, tras

realizar las conversiones de unidad pertinentes, determina el total de CO₂ emitido por la flota vehicular. La metodología descrita se fundamenta en principios aceptados internacionalmente. El consumo específico de combustible puede ser obtenido a partir de mediciones en ruta o mediante los manuales técnicos de los fabricantes de vehículos. El poder calorífico inferior, por su parte, representa la energía neta disponible en el combustible tras la combustión, y su uso es estándar en los inventarios de gases de efecto invernadero conforme a las directrices del IPCC [8]. Los factores de emisión empleados presuponen una combustión completa de la gasolina, de acuerdo con los valores publicados por el IPCC.

La conversión de emisiones de kilogramos a toneladas resulta crucial para comparar los resultados obtenidos con los objetivos de reducción de emisiones establecidos en acuerdos nacionales e internacionales. Mediante la aplicación anual de este esquema de cálculo, considerando posibles variaciones en D , c y la composición de los combustibles, se puede modelar la evolución de las emisiones hasta el año 2050. Esta proyección constituye una herramienta esencial para la evaluación científica del impacto de políticas de electrificación de flotas, introducción de biocombustibles y cambios tecnológicos en el sector transporte.

2.4 Simulación de escenarios

La construcción de los escenarios de mitigación en el modelo LEAP se estructuró

con base en criterios técnicos, lineamiento ambientales, normativos y metodológicos que permitieron modelar trayectorias prospectivas para el transporte de carga en el Valle de Aburrá entre 2025 y 2050.

Desde el punto de vista técnico, diversos estudios han demostrado el potencial de los vehículos eléctricos de batería (VEB) para reducir las emisiones del transporte terrestre. Un análisis del modelo *KIA Soul EV* bajo el enfoque Pozo-a-la-Rueda (Well-to-Wheel) evidenció una reducción del 73 % en las emisiones de CO₂ por kilómetro en comparación con su equivalente de motor de combustión interna [42]. En América Latina, un estudio realizado en la Zona Metropolitana del Valle de México estimó que la incorporación de vehículos eléctricos podría reducir hasta un 21 % las emisiones del sector transporte hacia 2030, siempre que la matriz energética esté basada en fuentes renovables [43].

Estos hallazgos destacan la relevancia de articular la electrificación del transporte con la transición energética, como condición necesaria para lograr reducciones sostenibles de CO₂ a largo plazo.

En las últimas décadas, el transporte terrestre ha contribuido de forma significativa al incremento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. La electrificación parcial del parque vehicular se presenta como una estrategia clave para la descarbonización del sector, aunque su eficacia depende del grado de penetración de vehículos eléctricos (VE) y de la intensidad

de carbono de la matriz eléctrica. [44].

En el contexto colombiano, el marco normativo proporciona un soporte institucional sólido para la implementación de estas estrategias. La Ley 2099 de 2021 establece incentivos fiscales y económicos orientados a promover tecnologías limpias en el transporte, mientras que el Documento CONPES 3943 de 2018 define metas concretas para la renovación del parque automotor de carga. Estas disposiciones se alinean con los compromisos internacionales de reducción de emisiones, como la Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDNN).

Considerando estos antecedentes, se definieron tres escenarios proyectados de mitigación para el periodo 2025–2050, diferenciados por el nivel de intervención tecnológica:

Escenario BAU (Business As Usual – Tendencial): representa una trayectoria sin implementación de nuevas políticas de mitigación, en la que se mantiene la evolución actual del parque automotor sin cambios significativos en su composición ni en la eficiencia energética del sistema.

Escenario MOD (Escenario moderado): contempla una penetración inicial del 15 % de vehículos eléctricos en todas las categorías, en línea con las metas establecidas en el Documento CONPES 4075. Este escenario se sustenta en la adopción de estándares Euro VI para vehículos pesados, así como en programas de chatarrización y/o salida obligatoria

de circulación de vehículos antiguos.

Escenario TRA (Escenario optimista de transición Acelerada 2050): representa un escenario optimista de electrificación intensiva del parque vehicular, en el que se proyecta una participación del 80 % de tecnologías cero emisiones al año 2050. Esta proyección se fundamenta en tendencias internacionales de descarbonización, desarrollos tecnológicos emergentes y la progresiva implementación de políticas de transición energética. Además, el escenario considera un crecimiento sostenido en la demanda de transporte y mejoras en la eficiencia de los motores diésel aún presentes en la flota.

En el caso de los vehículos eléctricos, si bien no generan emisiones directas durante su operación, sí producen emisiones indirectas derivadas de la generación de la electricidad utilizada para cargar sus baterías. Por ello, la estimación de su huella de carbono se basa en el consumo energético por kilómetro recorrido y en el factor de emisión de la matriz eléctrica nacional, lo que permite una comparación consistente con los vehículos de combustión interna.

Para estimar el impacto de una electrificación parcial, se adoptaron los siguientes supuestos técnicos:

- *Consumo energético medio eléctrico:*

$$c_{el} = 0,20 \text{ kWh/km}$$

- *Factor de emisión eléctrico:*

$$f_{el} = 0,45 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

El cálculo de las emisiones anuales de CO₂ por categoría vehicular bajo electrificación parcial se realizó mediante la siguiente formulación:

Sea t una categoría de vehículo. Definimos:

$$N_t = N_{\text{Diesel},t} + N_{\text{Gasolina},t} + N_{\text{GNV},t}, \quad (1)$$

$$N_{\text{VE},t} = 0.15 N_t, \quad (2)$$

$$\text{VKT}_t = \text{km/año promedio}, \quad (3)$$

$$E_{\text{unit},t} = \text{VKT}_t \cdot c_{el} \cdot f_{el} \quad (\text{kg CO}_2/\text{año por VE}), \quad (4)$$

$$E_t^{\text{VE}} = \frac{N_{\text{VE},t} \cdot E_{\text{unit},t}}{1000} \quad (\text{tCO}_2/\text{año}). \quad (5)$$

Los valores estimados fueron integrados al modelo LEAP para evaluar la contribución de los vehículos eléctricos a la reducción total de emisiones en el contexto operativo del Valle de Aburrá.

2.5 Análisis de resultados y formulación de recomendaciones

El análisis de resultados se orientó a comparar el comportamiento de las emisiones de CO₂ bajo los tres escenarios definidos (BAU, POL y TRA), a partir de las proyecciones generadas en el modelo LEAP para el periodo 2025–2050. La evaluación se centró en el impacto de la electrificación del parque vehicular, la evolución de la demanda y la eficiencia tecnológica sobre la reducción acumulada de emisiones.

El análisis comparativo entre escenarios permitirá identificar tendencias y brechas

Tabla 5: Emisiones totales de CO₂ por categoría de camiones en cada escenario al 2050 (Resultados LEAP, en miles de toneladas).

Categoría	2024 (Total)	BAU (Total)	MOD (Total)	TRA (Total)
Livianos	84.6	2 950.6	2 183.9	1 355.1
Medianos	999.4	34 479.7	25 803.8	16 010.5
Pesados	665.9	23 244.8	16 302.1	10 668.1
Tractocamiones	953.5	33 907.6	23 587.6	15 435.8
Volquetas	329.8	11 565.0	8 074.8	5 284.2
Total Emisiones de CO₂	3 043.2	106 147.7	75 952.1	48 753.7

que orienten la formulación de recomendaciones técnicas y de política pública, con base en el potencial de mitigación de cada estrategia y su viabilidad en el contexto local.

Tabla 4: Emisiones estimadas de CO₂ por tipo de vehículo y combustible (2024) en miles de toneladas

Categoría	Diésel (t)	Gasolina (t)	GNV (t)
Camiones livianos	76.0	8.4	0.2
Camiones medianos	813.1	185.0	1.3
Camiones pesados	601.5	55.6	8.7
Tractocamiones	931.1	19.9	12.5
Volquetas	309.3	19.7	0.9

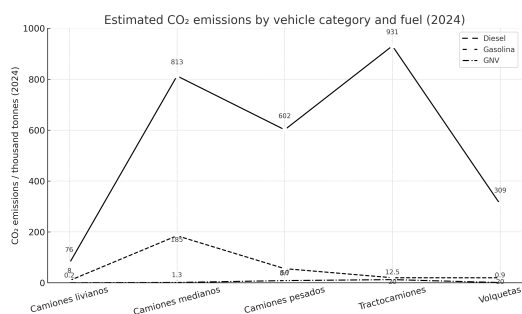


Figura 1: Emisiones estimadas de CO₂ por tipo de vehículo y combustible (2024).

3 Resultados

La validación metodológica del modelo generó los resultados estimados de emisiones para el año base 2024, los cuales se presentan en la Tabla 4. Esta estimación permitió establecer una línea base confiable a partir de la cual se analizaron las trayectorias de emisiones en los diferentes escenarios simulados en el periodo 2025–2050.

El comportamiento de las emisiones de CO₂ en los escenarios definidos se evaluó considerando los factores de emisión por tipo de combustible, la distribución del parque vehicular, la demanda proyectada de transporte y la incorporación progresiva de tecnologías limpias. Los resultados obtenidos permiten identificar el potencial de mitigación asociado a cada estrategia y constituyen la base para el análisis comparativo que se presenta a continuación.

En el escenario **BAU**, las emisiones acumuladas de CO₂ asociadas al transporte de carga en Colombia alcanzan un total de 106 147.7 miles de toneladas (mt) al

año 2050. Este resultado, producto de una trayectoria sin alteraciones en las políticas públicas ni en la composición tecnológica de los vehículos, evidencia un incremento sostenido de emisiones aproximadamente de un 2% anual, lo que conlleva a que el sector no este alineado con los objetivos de descarbonización. La distribución por categorías muestra que los camiones medianos y los tractocamiones son los principales emisores, con 34 479.7 mt y 33 907.6 mt respectivamente, seguidos por los vehículos pesados (23 244.8 mt), volquetas (11 565.0 mt) y livianos (2 950.6 mt).

Frente a esta proyección, el escenario **MOD**, que incorpora la norma Euro VI, un programa de chatarrización y/o la salida obligatoria de circulación de vehículos antiguos y una incorporación inicial del 15% de vehículos eléctricos (VE) en todas las categorías, permite reducir las emisiones acumuladas a 75 952.1 mt, lo que representa una disminución del 28% respecto al **BAU**. Las reducciones más significativas se observan en tractocamiones (-30%, hasta 23 587.6 mt) y vehículos pesados (-30%, hasta 16 302.1 mt). Los segmentos de camiones livianos y medianos también experimentan disminuciones, aunque más moderados, del orden del 26% (hasta 2 183.9 mt) y 25% (hasta 25 803.8 mt), respectivamente. No obstante, el impacto del escenario **MOD** se estabiliza a partir de 2031, debido a que la cuota de incorporación de VE no se incrementa más del 15%, y las mejoras de eficiencia asociadas a motores diésel Euro VI y al uso de biodiésel no son suficientes para sostener una trayectoria decreciente

de emisiones en el largo plazo.

Por su parte, el escenario **TRA** plantea una estrategia de electrificación intensiva del parque automotor de carga, con una alta participación de vehículos eléctricos en todas las categorías, combinada con mejoras sostenidas en la eficiencia de los motores diésel Euro VI aún presentes en la flota. Esta configuración permite reducir las emisiones acumuladas a 48 753.7 mt, lo que equivale a una disminución del 54% frente al **BAU** y del 36% respecto al escenario **MOD**. La tendencia de reducción se mantiene homogénea en todas las categorías vehiculares, con una disminución cercana al 54% respecto al escenario **BAU**. Específicamente, las emisiones acumuladas alcanzan 1 355.1 mt en camiones livianos, 16 010.5 mt en camiones medianos, 10 668.1 mt en camiones pesados, 15 435.8 mt en tractocamiones y 5 284.2 mt en volquetas.

En conjunto, el análisis de los tres escenarios permite concluir que, si bien la aplicación de las políticas vigentes bajo el esquema **MOD** logra mitigar aproximadamente una tercera parte de las emisiones proyectadas en el escenario **BAU**, solo la adopción de una transición acelerada como la propuesta en el escenario **TRA** basada en una electrificación masiva de los vehículos y en mejoras continuas de eficiencia tecnológica, permite superar la barrera del 50% de reducción acumulada de emisiones al año 2050. Para materializar esta trayectoria, resulta fundamental ampliar y prolongar los incentivos a los vehículos eléctricos, incluyendo exenciones tributarias y líneas

de financiamiento verde; intensificar el proceso de chatarrización de unidades anteriores a Euro VI; y desplegar infraestructura de recarga alimentada con fuentes renovables. Estas acciones son esenciales para que el sector de transporte de carga en el Valle de Aburrá cumpla con los compromisos establecidos en su Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDNN) y avance hacia una economía neutra en carbono.

Los resultados cuantitativos por categoría de camión y por escenario se sintetizan en la Tabla 5, que consolida las emisiones acumuladas estimadas al año 2050. Esta representación permite visualizar de forma comparativa la magnitud de las emisiones y la efectividad relativa de cada estrategia de mitigación.

4 Conclusión y Discusiones

El análisis realizado confirma que el sector de transporte terrestre de carga constituye una fuente significativa de emisiones de CO₂ en el Valle de Aburrá, impulsada por un parque automotor en constante crecimiento y una alta dependencia de combustibles fósiles. La modelación de escenarios a través de LEAP evidencia que, sin medidas de mitigación, las emisiones continuarían aumentando a una tasa aproximada del 2% anual, lo que comprometería los objetivos nacionales e internacionales de reducción de GEI.

El escenario con **MOD** logra una

mitigación moderada, alcanzando una reducción del 28% respecto al escenario base. Sin embargo, esta tendencia se estabiliza rápidamente al no profundizarse la electrificación ni renovarse de forma acelerada el parque vehicular. En contraste, el escenario de **TRA**, que contempla una penetración de tecnologías cero emisiones del 40–60% por categoría, demuestra ser el único camino capaz de alcanzar reducciones superiores al 50% en las emisiones acumuladas hacia 2050.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de políticas estructurales que trasciendan los incentivos actuales, incluyendo: ampliación de beneficios fiscales para vehículos eléctricos, fortalecimiento de los programas de chatarrización, y desarrollo de infraestructura de carga alimentada por fuentes renovables. Además, la alineación entre la electrificación vehicular y la descarbonización de la matriz energética resulta esencial para maximizar los beneficios ambientales de esta transición.

En términos metodológicos, el uso del modelo LEAP permitió integrar datos locales con estándares internacionales de estimación de emisiones, ofreciendo una herramienta robusta para la planificación energética y ambiental. Los resultados obtenidos pueden servir como base para políticas regionales que busquen integrar el desarrollo del transporte con la sostenibilidad ambiental, en concordancia con los compromisos asumidos en la Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDNN) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Aunque los escenarios proyectados mediante el modelo LEAP evidencian el potencial técnico para la reducción de emisiones en el sector de transporte de carga del Valle de Aburrá, su implementación efectiva requiere una estrategia operativa alineada con las capacidades institucionales, técnicas y financieras del contexto local. En este marco, se plantea una hoja de ruta escalonada en tres fases:

- (i) **Corto plazo (2025–2030):** ejecución de programas de retiro y sustitución de vehículos con tecnologías anteriores a la norma Euro IV, inicio de la electrificación de flotas urbanas de camiones livianos y medianos, e implementación de proyectos piloto de infraestructura de recarga en centros logísticos;
- (ii) **Mediano plazo (2031–2040):** expansión de la electrificación hacia camiones pesados y tractocamiones, mediante incentivos fiscales y esquemas de financiamiento verde, y consolidación de alianzas público-privadas para la instalación de estaciones de carga intermunicipales;
- (iii) **Largo plazo (2041–2050):** despliegue de tecnologías emergentes, como celdas de combustible de hidrógeno y biocombustibles avanzados, enfocadas en trayectos de larga distancia.

La viabilidad de esta transición depende, de manera crítica, del fortalecimiento de la infraestructura de recarga, la ampliación de la capacidad instalada del sistema eléctrico, la disponibilidad de instrumentos financieros que mitiguen las barreras

económicas iniciales para la adopción tecnológica, y de una gobernanza institucional articulada, liderada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en coordinación con el Ministerio de Transporte.

Asimismo, se propone el establecimiento de un sistema de monitoreo basado en indicadores clave, como: porcentaje de flota electrificada, reducción acumulada de emisiones de CO₂, número de estaciones operativas, volumen de inversión movilizadora y percepción de los actores logísticos. La traducción de las proyecciones del modelo en intervenciones específicas, calendarizadas y contextualizadas, constituye una condición necesaria para garantizar que las estrategias de mitigación sean técnica y políticamente viables, y que contribuyan de manera efectiva al cumplimiento de los compromisos climáticos nacionales.

Finalmente, una de las principales limitaciones es la disponibilidad y calidad de los datos, en particular aquellos relacionados con los patrones de conducción, el estado de las vías y la vigencia real del parque automotor registrado. En el contexto colombiano, la falta de articulación entre las bases de datos oficiales impide verificar con certeza si los vehículos registrados en cada uno de los municipios continúan en circulación activa. Esta situación representa una oportunidad clave para fortalecer la calidad de los insumos técnicos, ya que una mayor disponibilidad y articulación de datos permitiría mejorar la precisión de las estimaciones y aumentar la representatividad de los escenarios proyectados, contribuyendo así a potenciar la confiabilidad de los resultados.

Referencias

- [1] World Health Organization, "Air Pollution and Health," WHO, 2022.
- [2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, "Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia," IDEAM, 2022.
- [3] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press", 2021.
- [4] GiroZero - Universidad de los Andes, "Study and monitoring of the evolution of low emission truck pilots in Colombia," 2023.
- [5] International Transport Forum, "Transport Outlook 2023," OECD, 2023.
- [6] N. E. Ligterink et al., "A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation," *Transportation Research Part D*, vol. 17, pp. 487–491, 2012.
- [7] M. Espinosa Valderrama et al., "Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector," *Energy Policy*, vol. 124, pp. 111–122, 2018.
- [8] IPCC, "Metodología basada en factores de emisión, utilizada en los inventarios nacionales de GEI", *Energy*, vol. 3, 2016.
- [9] US EPA, "Latest version of MOTOR Vehicle Emission Simulator (MOVES)", US EPA, <https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves>, 2025.
- [10] M. Özen et al., "Estimation of Road Freight Transportation Emissions in Turkey", *Tesis, Middle East Technical University*, 2012.
- [11] CE-CERT, GSSR, y ISSRC, "Manual del Usuario del Modelo IVE, Versión 2.0," Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental (CE-CERT), Universidad de California en Riverside, 2008.
- [12] A. Valdes et al., "Estimation of on-road mobile emissions based on the vehicle technology in a high-traffic avenue in Panama City, Panama", *E3S Web of Conferences*, vol. 530, 01003, 2024,
- [13] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, "Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011," *Energy*, 2012.
- [14] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, "Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá Fuentes Móviles," *Energy*, pp. 18 -21, 2022.
- [15] Aguilar, J., Pérez, L., y Rodríguez, M. (2023). *Reducción de emisiones de CO₂ en la ciudad de Cochabamba, por la sustitución de minibuses a diésel por minibuses eléctricos en el transporte urbano*. Cochabamba, Bolivia.
- [16] Alvarado, C., Méndez, R., y Vargas, F. (2022). *Propuestas de reducción de emisiones de carbono negro para fuentes móviles en Costa Rica*. San José: Instituto

- Costarricense de Investigación Ambiental.
- [17] Sandoval, E. R., Franco-González, R. L. P. E., y Fernández-Morales, J. M. (2019). Vehículos eléctricos: ¿Una solución para reducir los gases de efecto invernadero proveniente del sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México? *Acta Universitaria*, 29, e1805.
- [18] M. Al-Jabir et al., "Low Transportation Emission Analysis and Projection Using LEAP: The Case of Qatar;" *Transport emissions*, 2023.
- [19] International Energy Agency, *Breakthrough Agenda Report 2023 – Road Transport*, IEA, Paris, 2023.
- [20] International Energy Agency, *CO₂ Emissions in 2023*, IEA, Paris, 2024.
- [21] K. Liu et al., "Decarbonising road freight transport: The role of zero-emission trucks," *Sci. Rep.*, 14:52682, 2024.
- [22] Y. Xie, "U.S. EPA Phase 3 greenhouse gas emission standards for heavy-duty vehicles," *ICCT Policy Update*, Sept. 2024.
- [23] U.S. Environmental Protection Agency, "Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles: Phase 3," *Fed. Reg.*, 2024.
- [24] IPCC, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (AR6 WGIII)*, Cambridge Univ. Press, 2022.
- [25] Solís, R., Jiménez, A., y Torres, C. (2015). *Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México y escenarios de mitigación*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- [26] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, VITO-UNIANDES, et al. (2022). *Portafolio de medidas sectoriales de mitigación de la NDC de Colombia*.
- [27] Dumortier, J., et al. (2023). *Colombia Climate and Development Report*.
- [28] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2022). *Plan de acción indicativo del PROURE 2022–2030*.
- [29] Banco Interamericano de Desarrollo y Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2024). *Cómo Colombia puede desarrollar el potencial de los empleos verdes*.
- [30] J. Wang et al., "Prospective assessment of low-carbon pathways for heavy-duty trucks," *Transp. Res. D*, 130:103669, 2024.
- [31] M. Rahman et al., "Lifecycle GHG performance of hydrogen fuel-cell trucks in long-haul freight," *Transp. Res. D*, 136:103982, 2024.
- [32] Z. Hussain et al., "Green transport, environmental taxes and CO₂ mitigation," *Transp. Lett.*, 14(5):439–449, 2022.
- [33] F. Creutzig et al., "Towards demand-side solutions for mitigating climate change," *Nat. Clim. Change*, 8:260–263, 2018.

- [34] H. Zhou *et al.*, “Decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality,” *Nat. Commun.*, 13:3629, 2022.
- [35] P. Santos *et al.*, “Prospective life-cycle assessment of sustainable alternatives for heavy-duty trucks,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 188:114191, 2024.
- [36] Y. Zhao *et al.*, “Challenges and opportunities in truck electrification revealed by big-data analytics,” *Nat. Energy*, 9:512–520, 2024.
- [37] J. A. Nieves *et al.*, “Energy demand and GHG emissions analysis in Colombia: A LEAP model application,” *Energy*, 169:380–397, 2019.
- [38] D. Cebon, “Can we take the brakes off the drive to decarbonise trucking?,” *Reuters*, 21 May 2025.
- [39] L. Cai *et al.*, “Pathways for electric power industry to achieve carbon emissions peak and carbon neutrality based on LEAP model,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 170, p. 108334, 2022.
- [40] X. Chen *et al.*, “Low-carbon route optimization model for multimodal freight transport considering value and time attributes,” *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 96, p. 102108, 2024.
- [41] M. Zhang *et al.*, “Research on the Drivers of Carbon Emissions from Highway Trucks Based on Pathway Analysis,” *Proc. SPIE*, vol. 13018, p. 1301836, 2023.
- [42] J. Hernández-Ambato, R. Fernández, A. Mora, y J. Alvarado, “Evaluación de la huella de carbono de vehículos con motor eléctrico y de combustión interna según la matriz energética de Ecuador: Caso de estudio KIA Soul vs KIA Soul EV,” *Informe Técnico*, 2022.
- [43] E.R. Sandoval-García, R.L.P.E. Franco-González, y J.M. Fernández-Morales, “Vehículos eléctricos: ¿Una solución para reducir los gases de efecto invernadero proveniente del sector transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?” *Acta Universitaria*, vol. 29, e1805, 2019.
- [44] Michelena, G., Iannuzzi, P., & Barafani, M. (2023). *Hacia una integración sostenible: el potencial de la electromovilidad en América Latina y el Caribe*. Nota Técnica IDB–TN–2805, Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, D. C.